

Analyse des filières de gazéification pour le CFPPA de Piton Saint-Leu et à l'échelle régionale, île de la Réunion

Rédaction : Sarah Audouin, CIRAD

Version du 01/03/16

*Validation : Laurent Gazull (CIRAD), Anthony Benoist (CIRAD), François Broust (CIRAD), SPL
Energie Réunion*

Résumé exécutif

Dans le cadre des objectifs du Schéma Régional Climat Air et Energie (SRCAE) établi par la Région Réunion et des objectifs fixés par la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), le développement des énergies renouvelables (EnR), dont la biomasse-énergie, est fixé comme un enjeu prioritaire. La Région Réunion a initié un projet d'installation d'une unité de gazéification au niveau du Centre de Formation Professionnelle de Promotion Agricole (CFPPA) de Piton Saint Leu, avec pour objectif principal (i) d'expérimenter la technologie sur des biomasses disponibles sur le territoire réunionnais et à terme (ii) de servir d'outil pédagogique et de démonstration du développement des EnR sur l'Ile. La gazéification est une réaction thermochimique qui permet de produire, à partir de biomasse ligneuse, un gaz (syngaz) directement valorisable en électricité et/ou chaleur. Ce rapport présente les résultats d'une étude préalable, consistant en l'évaluation géographique, économique et environnementale des filières potentielles de gazéification pour l'approvisionnement de la plateforme du CFPPA, ainsi que pour de futures plateformes envisagées à l'échelle régionale. Le travail réalisé s'est décomposé en trois étapes d'évaluation : i) la disponibilité en biomasse, qui a permis de construire des scénarios d'approvisionnement et de production d'électricité, ii) le coût de production de l'électricité selon ces différents scénarios et iii) les impacts environnementaux de ces scénarios par Analyse de Cycle de Vie (ACV).

La disponibilité en biomasse

L'évaluation de la disponibilité en biomasse prend en compte les contraintes naturelles, légales et techniques de mobilisation de la biomasse. Les résultats montrent que les potentiels de mobilisation de biomasse sont particulièrement importants pour trois biomasses : le bois d'Acacia mearnsii (espèce invasive, située dans les Hauts de l'Ouest), le bois de palette déclassée, et la paille de canne à sucre (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour ces trois biomasses, un diagnostic des filières fait apparaître les points suivants :

- Concernant le bois d'Acacia, le manque d'acteurs qualifiés, pour l'exploitation du bois par exemple, est certainement un frein majeur à la mobilisation de cette ressource. Pour la paille de canne, les résistances relevées chez les planteurs à vendre leur paille peut également réduire fortement le potentiel mobilisable. Ces deux éléments devront faire l'objet d'un accompagnement spécifique si ces biomasses sont retenues comme priorités.
- Inversement, les plateformes existantes de traitement de palette constituent un élément structurant intéressant pour envisager la mobilisation et la valorisation énergétique de cette ressource, sous condition de réaliser les démarches nécessaires à la sortie du statut de déchet.

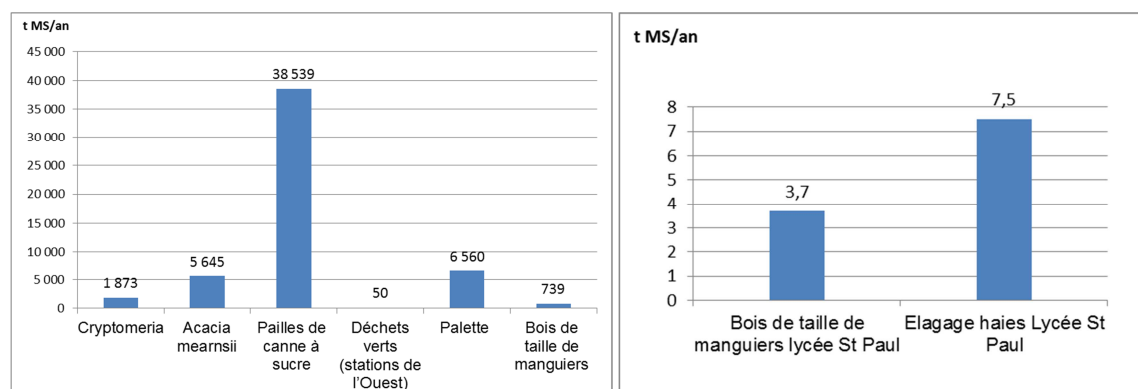


FIGURE 1 : POTENTIEL MOBILISABLE DES BIOMASSES SELECTIONNEES (TMS/AN)

Par ailleurs, la canne fibre a été retenue comme quatrième biomasse dans les scénarios d'approvisionnement, d'une part en raison de l'intérêt qu'elle suscite et d'autre part afin d'apporter des éléments complémentaires d'analyse sur cette filière. La canne fibre est une variété de canne à sucre sélectionnée pour sa forte teneur en fibre, sa très faible teneur en sucre et les forts rendements en biomasse (jusqu'à 150 tMB/ha, à 68% d'humidité à la récolte). Les recherches en cours sur cette variété portent sur la sélection variétale, les itinéraires de culture et les modes d'exploitation (CIRAD, eRcane). Le potentiel mobilisable n'a cependant pas pu être évalué sur cette biomasse, car il nécessiterait davantage d'éléments prospectifs quant à l'émergence de cette filière et à la localisation de ces cultures.

Les scénarios de production d'électricité

A partir des données collectées quant aux sources et aux quantités de biomasses disponibles, six scénarios de production d'électricité ont été construits. Quatre d'entre eux se réfèrent au fonctionnement de la plateforme du CFPPA, et deux se positionnent à une échelle régionale. Les scénarios ont été construits en tenant compte des paramètres suivants: les objectifs visés à ces différentes échelles, le type de biomasse valorisée, les acteurs impliqués dans la production ou l'exploitation de la ressource, et le dimensionnement envisagé de l'unité de gazéification.

- Les quatre scénarios à l'échelle du CFPPA visent à alimenter une unité de gazéification de 30 kWé, selon respectivement quatre sources d'approvisionnement : Acacia, palette, paille de canne ou canne fibre. Les deux dernières biomasses sont supposées être produites sur les parcelles du CFPPA afin de réduire les coûts d'approvisionnement.
- Les deux scénarios à l'échelle régionale sont basés pour le premier sur une unité de 100 kWé dans les Hauts de l'Ouest alimenté par de l'Acacia exploité par des forestiers, et pour le second sur une unité de 500 kWé située au Port alimentée par du bois de Palette provenant des unités de traitement de bois palette à proximité.

Analyse économique et environnementale

L'analyse économique a consisté à calculer le coût de production de l'électricité selon une méthode standardisée en incluant l'ensemble des charges fixes et variables depuis la mobilisation, l'exploitation ou l'achat de la biomasse, son transport selon la localisation des lieux de production et de transformation, l'installation et le fonctionnement de l'unité de gazéification. L'analyse environnementale s'est basée sur la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), qui prend en compte l'ensemble des impacts environnementaux depuis la production des matières premières, leur transport, transformations éventuelles jusqu'à la production de l'électricité par gazéification. L'analyse a été effectuée selon la norme ISO 14044 et les recommandations européennes de référence de l'ILCD. Elle inclut l'usage actuel de la biomasse (scénario de référence) et les impacts inhérents au changement d'usage induit par la mise en place d'une valorisation énergétique. Les résultats ont été comparés à la fois aux impacts environnementaux du mix électrique de la Réunion et à ceux plus spécifiques de la production d'électricité à partir de charbon à la Réunion, supposée être la source d'énergie à substituer par des énergies renouvelables. Dans les deux analyses, économique et environnementale, les résultats ont été rapportés à la quantité d'électricité produite, exprimée en MWh ou kWh.

Les analyses économique et environnementale ont été réalisées pour les scénarios à l'échelle de la plateforme du CFPPA, mais doivent être interprétés avec précaution. En effet, les spécificités de cette plateforme à visée essentiellement expérimentale (faible nombre d'heures de fonctionnement, très petite puissance installée de 30kWé, choix technique de séchage solaire de la biomasse, etc.) ont un impact fort

sur le coût de production et sur les indicateurs environnementaux. Les résultats obtenus ne sont donc pas transposables directement à des installations à vocation de production. Néanmoins, les tendances suivantes ressortent à titre comparatif. Le scénario bois de palette se distingue des autres scénarios à la fois par son moindre coût et par ses moindres impacts environnementaux. Au niveau économique, viennent ensuite les scénarios à base d'Acacia et de paille de canne, à performances similaires, puis celui à base de canne fibre qui présente le coût de production le plus élevé. Ce dernier résultat s'explique principalement par l'hypothèse du prix d'achat de la biomasse (fixé de façon à maintenir la même marge brute à l'hectare qu'avec la canne à sucre) et par la forte humidité de la biomasse à la récolte. Au niveau environnemental, le scénario paille de canne présente des performances en deçà de celles du bois de palette, du fait principalement du statut de la biomasse : déchet dans le cas du bois de palette, mais co-produit possédant une certaine valeur agronomique dans le cas de la paille de canne. Les scénarios à base d'Acacia et de canne fibre sont plus difficilement comparables aux autres puisque ceux-ci souffrent d'incertitudes importantes quant au scénario de référence considéré. Une étude plus fine des effets environnementaux associés à leur valorisation énergétique nécessiterait donc de clarifier le devenir de cette espèce invasive sur l'île concernant l'Acacia, et de déterminer les implications socio-économiques potentielles de l'implantation d'une nouvelle culture dans le cas de la canne fibre.

L'évaluation à l'échelle régionale est plus proche des conditions réelles de développement de telles filières, et est donc plus pertinente pour déterminer l'intérêt réel de l'émergence de celles-ci. Les caractéristiques de ces filières sont raisonnées de façon (i) à optimiser les coûts de transport entre les lieux de production et de valorisation de la biomasse, et (ii) à réduire les coûts et les impacts environnementaux par le dimensionnement des unités de gazéification (rationalisation de l'investissement, baisse de la consommation unitaire d'électricité, valorisation de la chaleur pour le séchage de la biomasse).

L'ensemble des résultats d'évaluation des scénarios à l'échelle régionale sont synthétisés dans le Tableau 1 ci-dessous et regroupent (a) le potentiel disponible et mobilisable, (b) l'évaluation économique, (c) l'évaluation environnementale. Des indicateurs qualitatifs sur les forces et faiblesses de la filière sont également rappelés, ils ne sont pas directement intégrés dans les indicateurs d'évaluation des scénarios mais influencent fortement l'essor de ces filières.

TABEAU 1 : SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RESULTATS D'ÉVALUATION DES SCENARIOS REGIONAUX

		Scénario régional Acacia (100 kWé, Hauts de l'Ouest)	Scénario régional palette (500 kWé, Port)
Evaluation globale de la filière	Forces	Filière qui s'intègre dans la lutte contre une espèce envahissante Fort potentiel de création d'emplois dans les Hauts de l'Ouest.	Filière qui s'intègre dans la valorisation des déchets Biomasse déjà collectée et concentrée dans les unités de traitement des bois palettes
	Faiblesses	Acteurs de la filière peu structurés (peu d'exploitants forestiers) Fort morcellement parcellaire des peuplements d'Acacia Contraintes réglementaires incertaines vis-à-vis du statut d'Espèce Exotique Envahissante. Itinéraire technique (durée des rotations, interventions sylvicoles) et données écologiques (accroissement ligneux, stock des peuplements mature) à définir.	Nécessité de procéder à la sortie du statut de déchet avant valorisation énergétique des palettes (unité classée ICPE) Paramètre de préparation de la biomasse (broyage, humidité) à valider pour une bonne maîtrise du procédé de gazéification, étudié principalement sur des plaquettes forestières à l'heure actuelle.
(a) Potentiel mobilisable		5 600 tMS/an	6 500 tMS/an
(b) Coût de production	Gamme de valeurs obtenues (avec 50 ou 0% de subvention à l'investissement pour l'unité de gazéification)	215 à 240 €/MWh	178 à 193 €/MWh
	Principal poste de dépense	Achat de l'Acacia (44 % du coût)	Charges de personnel (35 % du coût)
(c) Evaluation environnementale	Principales forces vis-à-vis de la filière charbon	Bénéfices attendus sur certains enjeux régionaux (qualité des eaux de rivière et pluies acides).	Bénéfice important attendu vis-à-vis du changement climatique. Bénéfices attendus sur certains enjeux régionaux (qualité des eaux de rivière, des eaux marines et pluies acides). Bénéfices attendus sur certains enjeux locaux de qualité de l'air (émissions de particules et de composés organiques volatils), du fait notamment d'une meilleure maîtrise de la dégradation de ces palettes en comparaison à la combustion de ces dernières telle que pratiquée à l'heure actuelle.
	Principales faiblesses vis-à-vis de la filière charbon	Risque vis-à-vis du changement climatique, du fait de la détérioration du stockage de carbone que constituent aujourd'hui les peuplements d'acacia. Ce risque disparaît s'il est décidé de toute façon d'éradiquer cette espèce invasive. Plus grande consommation de ressources minérales par kWh produit, du fait de capacités de production plus faibles.	Plus grande consommation de ressources minérales par kWh produit, du fait de capacités de production plus faibles.

Parmi les scénarios régionaux étudiés, la valorisation du bois de palettes déclassées permet d'obtenir des coûts de production de l'électricité moins élevés (178 à 193 €/MWh selon le niveau de subvention à l'investissement) et un impact environnemental plus faible en comparaison à la valorisation de l'Acacia. Les bénéfices environnementaux par rapport au charbon sont particulièrement importants pour le

changement climatique, les risques de pluies acides et les émissions locales de particules et de composés organiques volatils, néfastes pour la santé humaine via en particulier le risque accru d'apparition de maladies respiratoires. Ce scénario contribue à valoriser des déchets qui n'ont actuellement pas ou peu de débouchés et dont une partie est actuellement brûlée de façon illégale.

Le bois d'Acacia présente des coûts de production plus élevés (215 à 240 €/MWh) et un impact environnemental plus important, notamment sur le changement climatique. Cependant, ce résultat doit être considéré avec précaution car il est très sensible aux hypothèses formulées et aux données utilisées. Quatre limites majeures sont identifiées à ce jour. Premièrement, le devenir en l'état de ces peuplements est incertain du fait d'une politique territoriale peu claire quant à la stratégie et aux moyens de lutte contre cette espèce rendant ainsi le scénario de référence (maintien des peuplements matures) peu crédible à moyen terme. Deuxièmement, les données écologiques utilisées (stock de carbone dans les peuplements et courbe de croissance des peuplements) ne proviennent que partiellement d'études locales et nécessitent d'être consolidées. Troisièmement, la comparaison avec le charbon est source d'incertitudes du fait de l'absence de données locales sur les émissions de cycle de vie de l'électricité produite à partir de charbon dans les centrales thermiques de l'île, ce qui tend à sous-estimer leur impact sur le changement climatique. Quatrièmement, les bénéfices environnementaux attendus de la lutte contre une espèce envahissante ne sont pas des enjeux considérés à l'heure actuelle en ACV : restauration écologique, revalorisation de friches agricoles, maintien d'un écosystème et d'un patrimoine reconnu par l'UNESCO. Ces éléments invitent donc à considérer les impacts environnementaux de l'Acacia avec prudence et à ne pas exclure la valorisation énergétique de cette biomasse sur la seule base de ces résultats. L'ACV de ce type de filière pourra être approfondie après une réflexion plus globale sur le devenir de cette espèce invasive sur l'île de la Réunion. Enfin, le développement de cette filière permettrait la création d'emplois dans la zone des Hauts et la structuration des acteurs.

Globalement, au niveau économique, les coûts de production d'électricité de ces deux scénarios restent supérieurs aux tarifs d'achat actuels, mais des négociations tarifaires de gré à gré sont désormais possibles et permettraient d'atteindre la rentabilité économique. Au niveau environnemental, les scénarios Acacia et palette sont moins polluants que le charbon et globalement moins polluants que le mix électrique (excepté pour l'impact sur la raréfaction des ressources minérales, dû aux infrastructures et équipements requis). Ces résultats viennent renforcer l'intérêt du développement de telles filières à l'échelle régionale, en substitution du charbon.

D'un point de vue technique, les résultats économiques et environnementaux des scénarios à l'échelle du CFPPA et les simulations effectuées ont montré que la conception d'unités de gazéification doit veiller à optimiser certains paramètres, tels que la durée de fonctionnement, le mode de préparation de la biomasse (broyage et séchage) et la consommation électrique de l'unité. La récupération et valorisation locale de la chaleur est également une voie d'amélioration crédible des performances économiques et environnementales.

D'un point de vue méthodologique, pour l'ensemble de ces scénarios, l'accès aux données localisées des centrales thermiques de l'île, et particulièrement celles du charbon permettraient d'affiner considérablement les résultats de l'ACV en comparaison avec les performances des scénarios de gazéification.

Finalement, le développement de filières de gazéification à partir de bois de palette semble être la solution actuellement la plus avantageuse à court terme d'un point de vue de la disponibilité en biomasse, de la structuration des acteurs, des performances économiques et environnementales et de la valorisation des déchets. Les filières de gazéification dans les Hauts à partir de bois d'Acacia présentent un

potentiel à développer mais doivent faire l'objectif d'investigations et de mesures d'accompagnement supplémentaires (vision plus précise de la politique régionale de lutte contre cette espèce, structuration de la filière, données sylvicoles, itinéraires techniques appropriés, etc.). A moyen terme également, les résultats de l'analyse des scénarios à l'échelle du CFPPA montrent que la paille de canne présente un potentiel important en termes de disponibilité de biomasse, de coût de production et d'impacts environnementaux. De même des investigations supplémentaires devront être effectuées pour (i) expérimenter le comportement de cette biomasse en gazéification pour laquelle il existe peu de références actuellement et (ii) identifier les points de blocage à la mobilisation de cette biomasse (d'un point de vue agronomique, économique et social) et les dispositifs inhérents à mettre en place. Enfin, d'autres éléments d'analyse visant à renseigner la création de valeur économique et les impacts écologiques permettraient de mieux cibler les actions à mettre en place afin d'accompagner l'émergence de ces filières en vue d'atteindre les objectifs d'autonomie électrique de l'île.

Table des matières

RESUME EXECUTIF	2
TABLE DES FIGURES.....	11
TABLE DES TABLEAUX.....	12
TABLE DES CARTES	13
TABLE DES PHOTOGRAPHIES.....	13
INTRODUCTION	15
1. OBJECTIFS DE L'ETUDE	15
1.1. Objectifs de l'étude	15
1.2. La démarche générale de l'étude	15
2. METHODE.....	16
2.1. Méthode d'évaluation de la disponibilité en biomasse	16
2.1.1. Les différents niveaux de potentiels	16
2.1.2. Type de biomasse sélectionnée	17
2.1.3. Le potentiel théorique.....	17
2.1.4. Le potentiel disponible	18
2.1.4.1. Réglementation et droits d'accès	18
2.1.4.2. Usages concurrents.....	18
2.1.5. Le potentiel mobilisable	19
2.1.5.1. Les acteurs	19
2.1.5.2. Les contraintes techniques à la mobilisation	19
2.2. Méthode de construction et sélection de scénarios de filière de gazéification	19
2.2.1. Déterminer les objectifs des filières de gazéification	19
2.3. Évaluation économique.....	20
2.3.1. Le coût de production	20
2.3.1.1. Hypothèses de calcul du coût de production.....	21
2.3.2. Les coûts de transport.....	23
2.4. Évaluation environnementale par Analyse de Cycle de Vie	24

2.4.1.	Définition des objectifs de l'ACV	25
2.4.2.	Définition de l'unité fonctionnelle	26
2.4.3.	Sélection des indicateurs	26
2.4.4.	Analyse de contribution des impacts	28
2.4.5.	Grille de comparaison des impacts	28
3.	RESULTATS.....	30
3.1.	Evaluation de la disponibilité de biomasses pour la plateforme du CFPPA	30
3.1.1.	Le point sur la réglementation	30
3.1.2.	La ressource bois existante	31
3.1.2.1.	Bois de taille des vergers du lycée de St Paul	31
3.1.2.2.	Bois d'élagage du lycée de St Paul	32
3.1.2.3.	Bois de coupe issu des forêts publiques	33
3.1.2.4.	Bois d'Acacia issu du défrichement.....	35
3.1.3.	Filière déchets ligneux.....	41
3.1.3.1.	Broyat de bois palette.....	41
3.1.3.2.	Refus ligneux des stations de traitement des déchets verts.....	44
3.1.4.	Résidus agricoles	46
3.1.4.1.	Les pailles de canne à sucre	46
3.1.5.	Culture dédiée à l'énergie	48
3.1.5.1.	Canne fibre.....	48
3.1.5.2.	Plantations d'eucalyptus	50
3.1.6.	Synthèse et conclusions partielles	52
3.2.	Objectifs et scénarios de filière	55
3.2.1.	Objectifs de la plateforme du CFPPA	55
3.2.1.1.	Utilisation de la plateforme comme outil d'expérimentation	55
3.2.1.2.	Utilisation de la plateforme comme outil pédagogique	55
3.2.1.3.	Utilisation de la plateforme comme outil de démonstration	56
3.2.1.4.	Utilisation de la plateforme comme outil de production	56
3.2.2.	Les critères de sélection des scénarios selon les objectifs des filières de gazéification du CFPPA ..	57
3.2.3.	Exemples de scénarios pour la plateforme du CFPPA.....	57
3.2.4.	Les scénarios sélectionnés pour le CFPPA.....	58
3.2.5.	Panorama de objectifs des filières gazéification à l'échelle régionale	59
3.2.6.	Les scénarios sélectionnés	60
3.3.	Evaluation économique.....	63
3.3.1.	Scénarios CFPPA	63
3.3.1.2.	Performances économiques des scénarios CFPPA.....	63
3.3.1.3.	Recettes et bénéfices de la plateforme du CFPPA	68
3.3.1.4.	Analyses de sensibilité	69
3.3.2.	Scénarios Région	71
3.3.2.2.	Scénario Acacia dans les Hauts de l'Ouest.....	71
3.3.2.3.	Scénario Bois Palette dans les bas de l'Ouest	74
3.4.	Analyse de Cycle de Vie des scénarios	77
3.4.1.	Définition des limites des systèmes	77
3.4.1.1.	Scénarios de référence : mix électrique réunionnais et production électricité à partir charbon/fioul	77

3.4.1.2.	Scénarios CFPPA	77
3.4.1.3.	Scénarios à l'échelle régionale	81
3.4.2.	Description des systèmes.....	81
3.4.2.1.	Scénarios Acacia, palette et paille de canne sur le site du CFPPA	81
3.4.2.2.	Scénarios Acacia et palettes à l'échelle régionale	91
3.4.2.3.	Scénarios Canne fibre, CFPPA	91
3.4.3.	Interprétation des résultats de l'ACV	93
3.4.3.1.	Interprétation des scénarios CFPPA ; l'analyse de contributions	93
3.4.3.2.	Comparaison des scénarios CFPPA	104
3.4.3.3.	Scénarios Région	112
3.4.3.4.	Analyses de sensibilité	114
3.4.3.5.	Résultats de l'ACV de la canne fibre	123
CONCLUSION		128
BIBLIOGRAPHIE		133
GLOSSAIRE		136
UNITES DE CONVERSION		136
ANNEXES		137

Table des figures

Figure 1 : Potentiel mobilisable des biomasses sélectionnées (tMS/an)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Méthodologie en 7 étapes	16
Figure 3 : Les différents niveaux de potentiel	17
Figure 4 : Contrainte de déplacement selon la pente	24
Figure 5 Classes d'impact pour la comparaison des impacts environnementaux des scénarios par rapport aux impacts du charbon ou du mix électrique	28
Figure 6 : comparaison de la composition des cannes à sucre, mixtes et des cannes fibres (source : Alexander et al., 1984 ; Chopart et al., 2012 ; De Boer, 2007 ; eRcane; Pouzet, 2011 ; Sabatier, 2012, in Tricard, SYPECAR 2015).	48
Figure 7 chaîne d'approvisionnement et acteurs du scénario 1 : Bois palette dans les Bas	60
Figure 8 : SWOT du scénario 1 : Bois Palette dans les Bas	61
Figure 9 : chaîne d'approvisionnement du scénario 2 : <i>Acacia mearnsii</i> dans les Hauts	62
Figure 10 : SWOT du scénario 2 : <i>Acacia mearnsii</i> dans les Hauts	63
Figure 11: Coût de production des 4 scénarios CFPPA pour deux durées de fonctionnement	66
Figure 12 : évolution du coût de production en fonction de la durée de fonctionnement	70
Figure 13 : évolution du coût de production en fonction de la puissance installée	70
Figure 14 : coûts de production des scénarios Acacia Région	74
Figure 15 : Décomposition du coût de production pour le site de Petite France avec 50% de subventions à l'investissement.	74
Figure 16 : Coût de production des scénarios palette Région avec 50 et 0% de subvention à l'équipement	76
Figure 17 : décomposition du coût de production pour le scénario bois palette Région	76
Figure 18 : Limites du système ACV pour le scénario palette	78
Figure 19 : Limites du système ACV pour le scénario Acacia	79
Figure 20 : limites du système ACV pour le scénario paille de canne	80
Figure 21 : Limites du système ACV pour le scénario canne fibre	81
Figure 22 : représentation de la modélisation de la production d'électricité à partir de biomasse pour l'Analyse de Cycle de Vie	82
Figure 23 : Variation des stock de carbone pour les peuplements d'Acacia matures et exploités	83
Figure 24 : Emission agricoles comptabilisées suite à l'exportation des pailles de canne à sucre	86
Figure 25 : composition du bois d'Acacia (MS)	88
Figure 26 : Diagramme de contribution aux impacts environnementaux pour le scénario "Acacia CFPPA" (méthode ILCD 2011, Midpoint).	93
Figure 27 : Diagramme de contribution aux impacts environnementaux pour le scénario "Palette CFPPA" (méthode ILCD 2011, Midpoint).	98
Figure 28 : Diagramme de contribution aux impacts environnementaux pour le scénario "Paille CFPPA" (méthode ILCD 2011, Midpoint).	101
Figure 29 : Comparaison des impacts environnementaux des 3 scénarios du CFPPA selon 4 étapes du cycle de vie	105
Figure 30 : Comparaison des trois scénarios CFPPA Acacia, Palette, Pailles de canne	106
Figure 31 : Contribution des différentes étapes du cycle de vie pour la production électrique à partir de charbon	108
Figure 32 : Impacts environnementaux du mix électrique 2014 (BER 2014)	110
Figure 33 : Evaluation de l'impact de la raréfaction des ressources minérales et fossiles selon la méthode ReCipE	112

Figure 34 : Conséquences pour le scénario Acacia CFPPA de l'évolution de la composition du mix électrique (le mix électrique 2023 correspond à une augmentation par 3 de l'électricité produite à partir de bagasse, en substitution de celle produite par le charbon).....	117
Figure 35 : Emissions de GES du scénario Acacia CFPPA selon les hypothèses scénarios de référence.....	120
Figure 36 : Sensibilité à la consommation électrique de la plateforme pour les 3 scénarios CFPPA (baisse de la consommation de 23%).....	121
Figure 37 : Evolution des indicateurs environnementaux avec autoconsommation de l'électricité produite	123
Figure 38: Comparaison des flux globaux d'électricité avec ou sans autoconsommation de l'électricité produite.....	123
Figure 39 : Diagramme de contribution aux impacts environnementaux pour le scénario "Canne Fibre CFPPA" (méthode ILCD 2011, Midpoint).....	124

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des principaux résultats d'évaluation des scénarios régionaux.....	5
Tableau 2 : Hypothèses de calcul du coût de production de l'électricité pour les scénarios CFPPA	21
Tableau 3 : Hypothèses de calcul du coût de production de l'électricité pour les scénarios Acacia et palette Région.....	22
Tableau 4 : Données spatiales utilisées pour le calcul des coûts de transport	23
Tableau 5 : Coût de transport des biomasses selon le type de voies de circulation.....	23
Tableau 6 : Indicateurs environnementaux retenus	27
Tableau 7 : Seuils de signification pour la comparaison des impacts environnementaux.....	28
Tableau 8 : Productivité des produits forestiers des plantations ONF de cryptomeria et de Tamarin (ONF 2011)	33
Tableau 9 : Évaluation de la productivité des peuplements d' <i>Acacia mearnsii</i> (Hauville, CIRAD 2005).....	37
Tableau 10 : Synthèse des potentiels théoriques, disponibles et mobilisables de l' <i>Acacia mearnsii</i>	41
Tableau 11 : Potentiel théorique de broyat de bois palette	42
Tableau 12 : potentiels théoriques et disponibles du bois de palette	43
Tableau 13 : Potentiel théorique des refus ligneux de bois en station de traitement des déchets verts de l'Ouest	45
Tableau 14 : Répartition de la matière sèche de la canne fibre (SYPECAR 2015)	49
Tableau 15 : Synthèse des potentiels des biomasses et part de l'énergie thermique mobilisable pour le gazéifieur du CFPPA (1880h/an).....	52
Tableau 16 : exemples de scénarios pour la plateforme CFPPA	58
Tableau 17 : Scénarios sélectionnés pour la plateforme du CFPPA	59
Tableau 18 : Décomposition du coût de production pour les 4 scénarios pour 1880h de fonctionnement annuel.....	67
Tableau 19 : décomposition du coût de production pour les 4 scénarios pour 6000 h de fonctionnement annuel.....	68
Tableau 20 : Recettes et bénéfices de la plateforme du CFPPA.....	69
Tableau 21 : Facteurs d'émission en foyer ouvert (INERIS et al. 2008).....	83
Tableau 22 : Répartition des éléments minéraux et organiques dans les différents produits et sous-produits de la gazéification	88
Tableau 23: Principaux éléments de la composition de la matière sèche et des cendres de l' <i>Acacia</i> , du bois de Palette et de la Paille de canne (données Phyllis).....	89
Tableau 24 : Composition du mix électrique à La Réunion en 2014 (OER 2015)	90

Tableau 25: Traitements phytosanitaires apportés à la canne fibre.....	92
Tableau 26 : Comparaison des scénarios CFPPA par rapport aux impacts de l'électricité produite à partir de charbon	108
Tableau 27 : Comparaison des scénarios CFPPA par rapport aux impacts du mix électrique de la Réunion	111
Tableau 28 : Comparaison des scénarios Région par rapport aux impacts de l'électricité issue du charbon	113
Tableau 29 : Comparaison des scénarios Région par rapport aux impacts de l'électricité issue du mix électrique	114
Tableau 30 : sensibilité des émissions de GES de l'ensemble des scénarios à la valeur d'émission de GES du charbon	116
Tableau 31 : Composition du mix électrique à La Réunion en 2014 (OER 2015) et composition estimée en 2023 (PPE 2015)	117
Tableau 32 : Comparaison des scénarios CFPPA avec un mix électrique 2023 par rapport aux impacts du charbon	118
Tableau 33 : Comparaison des scénarios CFPPA avec le mix électrique 2023, par rapport aux impacts du mix électrique 2014 de la Réunion.....	119
Tableau 34 : Comparaison des impacts environnementaux à ceux de l'électricité issue du charbon, avec réduction de la consommation électrique de la plateforme de 23%.....	122
Tableau 35 : Comparaison des impacts du scénario Canne Fibre CFPPA par rapport aux impacts de l'électricité produite à partir du charbon et de l'électricité du mix électrique Réunion	127
Tableau 36 : objectifs et scénarios sélectionnés.....	129

Table des cartes

Carte 1 : Localisation des peuplements d' <i>Acacia mearnsii</i>	36
Carte 2 : Potentiels théoriques, disponibles et mobilisables d' <i>Acacia mearnsii</i>	40
Carte 3 : Localisation des terres à vocation sylvicole (d'après étude Cyathéa 2003)	51
Carte 4 : Répartition des coûts de transport du bois d' <i>Acacia mearnsii</i> pour l'approvisionnement de la plateforme du CFPPA	64
Carte 5 : Coûts de transport du bois d' <i>Acacia</i> localisé a proximité du CFPPA.....	65
Carte 6 : Répartition des coûts de transport pour le scénario <i>Acacia</i> Région à Petite France.....	72
Carte 7 : Répartition des coûts de transport pour le scénario <i>Acacia</i> Région à Notre Dame de la Paix	73

Table des photographies

Photographie 1 : Grumes (bois d'œuvre) de <i>Cryptomeria</i> sur plantation ONF (Audouin 2015)	34
Photographie 2 : Produits connexes dégagés après exploitation de <i>cryptomeria</i> (Audouin 2015).....	34
Photographie 3 : Plaquettes forestières de <i>Cryptomeria</i> , COPOBOIS (Audouin 2015).....	34
Photographie 4 : floraison d' <i>Acacia mearnsii</i> (Audouin 2015).....	37
Photographie 5 : En second plan, peuplement d' <i>Acacia mearnsii</i> dans les Hauts de l'Ouest (Hauville 2005)	37
Photographie 6 : Stockage du bois buche sur la plateforme de l'ACCC (Audouin 2015)	38
Photographie 7 : Stockage de palettes avant traitement (Audouin 2015)	42
Photographie 8 : Broyat de bois palette (Audouin 2015)	42

Photographie 9 : Refus ligneux en entrée de plateforme, Station de traitement des déchets vert de Saint Leu, (Audouin 2015)	45
--	----

Introduction

Avec l'élaboration du Schéma Régional Climat Air et Energie (SRCAE)(Région Réunion 2013) et de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (2018-2023) ; la Région Réunion s'est dotée d'une politique ambitieuse en matière de développement des énergies renouvelables. Le SRCAE donne pour objectif d'atteindre l'autonomie énergétique de l'île à l'horizon 2030 à partir d'énergies renouvelables. La PPE, actuellement en cours de validation, vise à multiplier par 3,4 la production électrique à partir de biomasse (bagasse, biogaz, biomasse sèche (ligneuse) pour la gazéification ou l'ORC).

Dans ce cadre, la Région Réunion a lancé un projet de gazéification, sous le financement du fond européen FEADER. Une plate-forme de gazéification de 30 kWé sera installée au lycée agricole (CFPPA) de Piton Saint-Leu. La maîtrise d'ouvrage est déléguée à la SPL Energies-Réunion. L'assistance à Maître d'Ouvrage pour la conception et la construction de la plateforme est attribuée à la société Bee&co. La maîtrise d'œuvre pour l'expertise scientifique et technique, pour la réalisation d'une étude de filière ainsi que pour l'élaboration d'un programme d'expérimentation sur la plateforme est attribuée au CIRAD.

1. Objectifs de l'étude

1.1. Objectifs de l'étude

L'étude des filières d'approvisionnement en biomasse-énergie pour la gazéification a pour objectif d'identifier les ressources disponibles, les scénarios d'approvisionnement et d'évaluer leur coût économique d'approvisionnement et de production d'électricité ainsi que leur impact environnemental. L'échelle d'analyse est celle de la plateforme de gazéification du projet Syngaz au CFPPA de Piton Saint-Leu. L'étude est ensuite étendue à l'ensemble de la région Réunion, pour différentes capacités d'installation de gazéification (petites et moyennes). Elle permet d'identifier les scénarios les plus pertinents d'un point de vue énergétique, économique et environnemental.

Le présent rapport présente dans une première partie l'évaluation de la disponibilité de la biomasse pour l'approvisionnement de la plateforme du CFPPA de Piton Saint Leu, ainsi que l'évaluation de la biomasse disponible à l'échelle de la Région. La seconde partie présente les objectifs opérationnels de la plateforme du CFPPA ou à l'échelle régionale puis les scénarios d'approvisionnement afférents. Dans une troisième partie sont présentés les résultats de l'évaluation économique. La quatrième partie est consacrée à l'analyse environnementale par Analyse de Cycle de Vie (ACV).

1.2. La démarche générale de l'étude

La méthode se décompose en 7 étapes successives, décrites dans la figure ci-dessous :

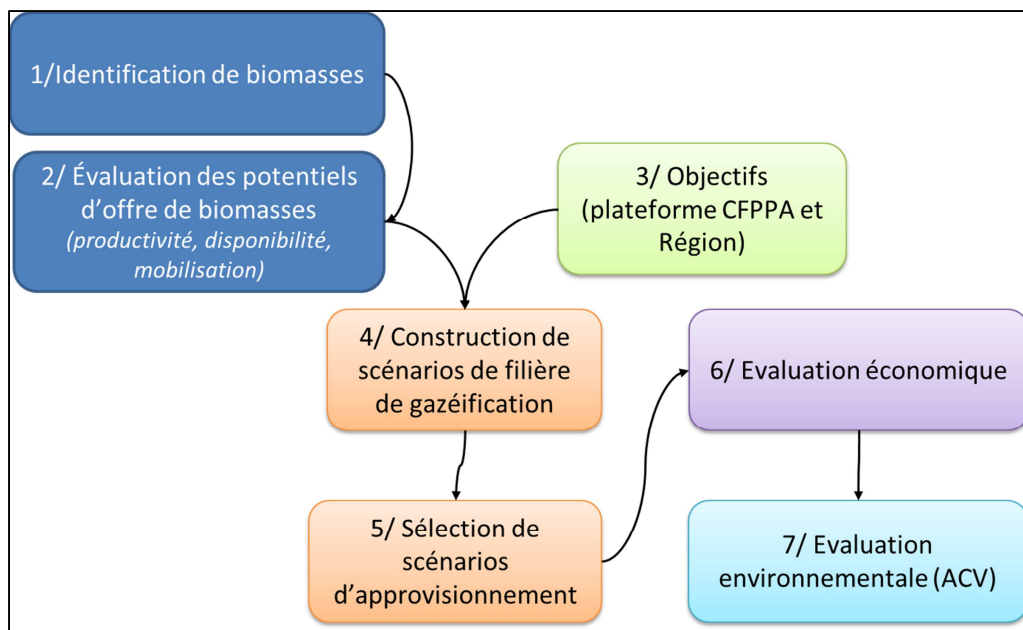


FIGURE 2 : METHODOLOGIE EN 7 ETAPES

- 1/ Identification de biomasses ligneuses et sèches potentiellement valorisables par gazéification
- 2/ Evaluation des potentiels d'offre de biomasses selon trois niveaux de potentiels : théorique, disponible et mobilisable
- 3/ Détermination des objectifs assignés à la plateforme du CFPPA, avec les partenaires du projet et identification d'objectifs de filières de gazéification à l'échelle de la Région.
- 4/ Construction de scénarios de filière de gazéification pour le CFPPA et pour la Région
- 5/ Pour la plateforme du CFPPA, sélection de 2 ou 3 scénarios de filière correspondant aux objectifs déterminés en étape 3. Pour l'échelle de Région, sélection de 2 scénarios d'intérêt, correspondants à deux objectifs distincts.
- 6/ Évaluation économique des scénarios sélectionnés
- 7/ Évaluation environnementale des scénarios sélectionnés, par la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Cette méthode consiste à identifier un ensemble d'impacts environnementaux sur l'ensemble de la chaîne de production, ramené au kWh produit.

2. Méthode

2.1. Méthode d'évaluation de la disponibilité en biomasse

2.1.1. Les différents niveaux de potentiels

Le potentiel théorique correspond à la quantité de biomasse produite dans un lieu donné.

Le potentiel disponible correspond à la fraction de potentiel théorique qu'il est possible de mobiliser pour une valorisation énergétique, compte tenu de la réglementation et des droits d'accès dont elle fait l'objet et sans impacter sur ses usages concurrents.

Le potentiel mobilisable : fraction de potentiel disponible qu'il est possible d'exploiter pendant une année, compte tenu de la diversité des acteurs et des contraintes techniques à sa mobilisation (y compris l'itinéraire technique d'exploitation de la ressource).

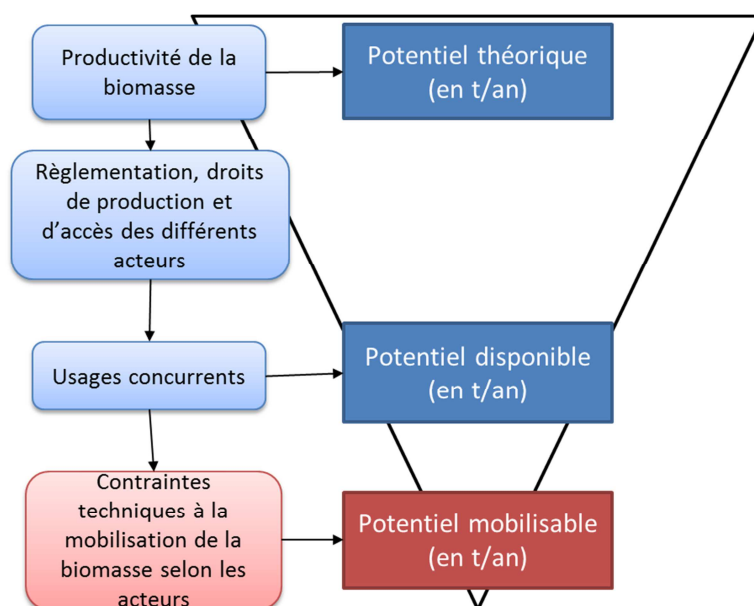


FIGURE 3 : LES DIFFERENTS NIVEAUX DE POTENTIEL

2.1.2. Type de biomasse sélectionnée

Les biomasses sélectionnées pour l'évaluation de leur disponibilité sont des biomasses adaptées au procédé de gazéification, c'est-à-dire des biomasses ligneuses et à faible teneur en humidité. En effet, premièrement la gazéification est actuellement bien maîtrisée à partir de biomasses telles que les plaquettes forestières¹. Deuxièmement, les spécificités du gazéifieur concernant la biomasse en entrée de procédé sont une humidité maximale de 15 à 20% et une granulométrie d'environ 3*4 cm. Etant donné qu'une chaîne de pré-traitement de la biomasse est généralement intégrée aux plateformes de gazéification afin d'atteindre ces critères (broyage puis séchage), les biomasses ligneuses d'une humidité maximale de 70 % seront acceptées. Il n'y a pas de contraintes particulière pour la granulométrie des biomasses sélectionnées, car celles de granulométrie supérieure seront broyées, et celles de granulométrie inférieure pourront être densifiées dans une chaîne de pelletisation (également appelée granulation). Il en résulte que l'ensemble des biomasses ligneuses produites sur l'île (bois de coupe forestière, bois déchet, résidus agricoles « solides ») sont acceptés.

En revanche, les effluents d'élevage, ne contenant pas de lignine et à forte teneur en humidité (> 80%) seront exclus. Les résidus d'industries agro-alimentaires, tels que les déchets de mangues (peau, pulpe, mangues déclassées) seront également exclus pour les mêmes raisons.

D'autres biomasses, de type résidus agricoles, tels que les plans d'ananas, ou les boues de STEP séchées, à faible teneur en humidité mais dont le pouvoir calorifique n'est pas renseigné n'ont pas été retenus. Ces biomasses pourront cependant faire l'objet d'une évaluation ultérieure après s'être assuré qu'elles présentent un pouvoir calorifique intéressant, une faible teneur en cendres et des niveaux d'émissions acceptables lors de la gazéification.

2.1.3. Le potentiel théorique

Le potentiel théorique est évalué à partir du niveau de productivité de la biomasse. Selon le type de biomasse étudié, la productivité est mesurée à partir de différents indicateurs :

¹ Voir glossaire

- les ratios produit noble/résidus pour les biomasses de type résidus agricoles (paille de canne) ou des produits forestiers (fraction de bois énergie) ;
- les rendements moyens annuels estimés pour les cultures dédiées (canne fibre, eucalyptus) ou pour l'exploitation de peuplements d'espèces forestières (*Acacia mearnsii*) ;
- le recensement des quantités annuelles produites sur l'île pour les déchets et de leur caractérisation.

Pour les résidus agricoles, forestiers et les cultures dédiées, la productivité totale est ensuite rapportée à la surface concernée par ces biomasses. Selon les biomasses, la surface est évaluée à partir de données statistiques, documents stratégiques de la Région, études spécifiques, fournies par des personnes ressources, ou encore par analyse spatiale à partir de données SIG. Pour les déchets, elle est rapportée aux capacités de traitement des déchets des unités concernées (stations de traitement des déchets verts ou sociétés de traitement des déchets).

2.1.4. Le potentiel disponible

2.1.4.1. Réglementation et droits d'accès

Les biomasses pré-identifiées étant d'origine agricole, forestière ou issues de la filière déchet, il convient donc d'intégrer les contraintes réglementaires dans l'évaluation de la disponibilité de ces biomasses. En effet, dans la filière déchet, les matières organiques sont considérées comme des déchets et doivent faire l'objet d'une procédure de « sortie de statut de déchet » pour être considérées comme des « biomasses » avant d'être valorisées dans des filières énergétiques.

D'après le code de l'énergie, la biomasse se définit comme « *la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers* » (article L211-2 du code de l'énergie).

Depuis le 1^{er} janvier 2014, une nouvelle réglementation² modifie les règles de classement et d'approvisionnement des installations de combustion dans la nomenclature ICPE (Installation classée pour l'environnement) est devra être prise en compte dans l'évaluation de la disponibilité de la biomasse.

Par ailleurs, les droits d'accès aux biomasses seront intégrés dans l'évaluation, en particulier s'ils sont différents selon les acteurs qui produisent, exploitent ou exportent la biomasse. Certaines biomasses peuvent faire l'objet d'une contractualisation formelle ou d'un accord informel entre le producteur de la biomasse et celui qui l'exploite ou qui l'exporte. Par exemple, pour le bois énergie exporté à partir de coupes réalisées sur le domaine privé, il convient d'intégrer les droits de chacun des acteurs selon les biomasses concernées.

2.1.4.2. Usages concurrents

L'évaluation du potentiel disponible prend également en compte les usages concurrents des biomasses. Afin de ne pas priver certains acteurs de l'usage actuel de certaines biomasses, la fraction de biomasse déjà utilisée pour un usage précis sera exclue du potentiel disponible.

² Arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion), arrêté du 24 septembre 2013.

2.1.5. Le potentiel mobilisable

2.1.5.1. Les acteurs

L'évaluation du potentiel mobilisable dépend du type d'acteur considéré. En effet le type d'acteur influence le mode d'exploitation et de mobilisation possible de la biomasse : collectivité territoriale, société privée, exploitant agricole, association. Une typologie d'acteurs pouvant exploiter et mobiliser la biomasse sera donc proposée.

2.1.5.2. Les contraintes techniques à la mobilisation

Les contraintes techniques à la mobilisation dépendent du type d'acteur mais aussi des seuils de rentabilité économique à l'exploitation de la biomasse. Par exemple, des moyens techniques importants peuvent être déployés dans le cas d'une filière de valorisation économique d'une biomasse à forte valeur ajoutée. Dans cette première phase d'évaluation du potentiel mobilisable, nous nous limiterons dans un premier temps à des contraintes techniques correspondant aux pratiques actuelles ou envisageables à faible coût. Sur l'île de la Réunion, la possibilité de mécaniser les opérations d'exploitation ou d'exportation de la biomasse sont les contraintes techniques principales, ce qui inclut des critères d'accessibilité aux routes et d'inclinaison de la parcelle. Par exemple, pour le bois énergie, les seuils techniques actuels d'exploitation sur les coupes forestières seront retenus (pente maximale de 50%, distance aux dessertes forestières de 150 m).

2.2. Méthode de construction et sélection de scénarios de filière de gazéification

2.2.1. Déterminer les objectifs des filières de gazéification

Déterminer le ou les objectifs consiste à répondre à la question « **pourquoi** vouloir développer de telles filières ? » Le type d'objectif assigné à une filière de gazéification, et plus largement à une filière biomasse-énergie, conditionne l'émergence même de ces filières. En effet, les combinaisons possibles entre biomasses disponibles, acteurs, mode d'approvisionnement, mode de transformation et de consommation sont multiples. L'émergence de telle ou telle filière peut être favorisée par des incitations publiques ou des partenariats, selon les objectifs recherchés. La production d'électricité peut ainsi apparaître comme un objectif prioritaire, avec l'objectif mentionné dans le SRCAE de la Réunion de substitution totale de l'électricité issue d'énergies fossiles par les énergies renouvelables. D'autres objectifs peuvent également être recherchés, selon les orientations politiques et le contexte socio-économique. Ainsi, la production d'électricité n'est pas toujours l'objectif principal, particulièrement dans le cas de petites unités décentralisées ou d'unités pilotes pour lesquelles le coût de production est parfois prohibitif. L'aménagement territorial, le développement d'une économie circulaire et la création d'emplois en milieu rural peuvent ainsi prendre le pas sur la rentabilité économique de ce genre de filière et devenir des objectifs prioritaires.

Après avoir déterminé le « pourquoi ? », il convient ensuite de répondre au « **comment** ? », c'est-à-dire d'identifier la combinaison de biomasse/acteurs/mode de production/de transformation et de valorisation énergétique, qui réponde au mieux à l'objectif prioritaire. Un ensemble de critères et indicateurs sont donc proposés pour chaque objectif, afin d'identifier le scénario qui réponde au mieux à l'objectif.

A partir de ces éléments, des dispositifs de soutien et d'accompagnement (publics et/ou privé) peuvent être construits afin d'atteindre ces objectifs.

La détermination de l'objectif de la plateforme de gazéification, puis la sélection de scénarios correspondants est effectuée par concertation avec l'ensemble des partenaires du projet (Région, CFPPA, CIRAD, SPL Energie Réunion). En ce qui concerne l'étude à l'échelle régionale, la détermination du (des) objectif(s) relève d'un niveau de décision en matière de politique territoriale qu'il n'est pas possible d'atteindre dans le cadre de cette étude. Aussi, un panorama des objectifs possibles sera proposé et deux filières seront sélectionnées de façon à correspondre à deux objectifs distincts.

2.3. Évaluation économique

L'évaluation économique des scénarios sélectionnés consistera à déterminer le coût de production de l'électricité. Dans les filières biomasse-énergie, les coûts de transport représentent généralement une part prépondérante dans la composition du coût de production. La méthode de calcul des coûts de transport sera présentée ci-après.

2.3.1. Le coût de production

Le coût de production est évalué en comptabilisant l'ensemble des charges fixes et variables, rapporté à la production d'électricité pour une année³.

Les charges fixes comprennent :

- les coûts d'investissements (I), amortis de façon linéaire selon la durée de vie de l'équipement (n). Les subventions (s) à l'équipement y sont déduites ;
- les frais financiers (r), c'est-à-dire les taux d'intérêt d'un prêt bancaire.

Les charges variables comprennent :

- les coûts annuels de maintenance (M);
- les coûts annuels d'achat (B) et le transport (T) de la biomasse ;
- le coût d'élimination des cendres (C) ;
- et les charges annuelles de personnel (W) (charges patronales comprises).

L'ensemble de ces coûts sont ensuite rapportés au kWh produit (E), en fonction de la durée de fonctionnement de l'unité de gazéification.

Le coût de production de l'électricité (P_{elec}) est calculé selon la formule suivante :

$$P_{elec} = \frac{\frac{I}{n} * (1-s) * r + M + B + T + C + W}{E}$$

Le coût de production ne prend pas en compte les frais d'imposition, les frais d'assurances ou le taux d'inflation. Au niveau des coûts l'investissement, l'ensemble des coûts sont comptabilisés y compris les coûts de transport maritime de l'équipement. En revanche, le coût de connexion au réseau électrique ne sera pas comptabilisé, les données étant variables d'un site à l'autre.

Concernant le prix d'achat de la biomasse, les prix du marché des biomasses bord-champ ou départ usine seront privilégiés pour les biomasses qui font déjà l'objet de transactions marchandes. En revanche, pour les biomasses non produites actuellement ou n'ayant pas de prix de marché, le prix de vente sera égal au

³ À noter qu'il existe une autre méthode de calcul du coût de l'électricité, proposée par l'IEA (Agence Internationale de l'électricité) : le coût actualisé de l'électricité ou « levelized cost of electricity » (LCOE)(IEA 2010). La formule intègre la somme des coûts actualisés d'investissement, de maintenance et de d'opération, de consommation de carburants fossiles, le coût du carbone émis et le coût du démantèlement de l'installation. Cette méthode est couramment utilisée pour comparer le coût de différentes technologies. Elle n'a pas été choisie afin de calculer le coût réel de production, d'intégrer différents niveaux de subvention et de dissocier les frais financiers (correspondants au taux d'actualisation) selon la part d'investissement propre de chaque type de scénario.

coût d'opportunité. Ce coût représente le coût du changement de pratique entre une situation initiale et la production ou l'exploitation de la biomasse ciblée.

Dans le cas des scénarios concernant la plateforme du CFPPA, le niveau de subvention du projet sera pris en compte dans les charges fixes et aucuns frais financiers ne seront comptabilisés. Les coûts de production seront calculés pour deux durées de fonctionnement du gazéifieur (1 880 et 6 000 h/an). Dans le cas des scénarios à l'échelle régionale, la durée de fonctionnement sera fixée à 6 000 h/an car elle correspond davantage au fonctionnement des unités de production d'électricité. Deux niveaux de subventions seront évalués (0 et 50 %) et les frais financiers seront appliqués au coût d'investissement propre.

Il convient de souligner que d'autres indicateurs micro ou macro-économiques, tels que la valeur et la répartition de la valeur ajoutée entre les agents des filières permettraient de compléter cette analyse des performances économiques des scénarios.

2.3.1.1. Hypothèses de calcul du coût de production

Les hypothèses de calcul pour l'évaluation du coût de production des différents scénarios du CFPPA et à l'échelle régionale sont présentées dans les tableaux ci-dessous (Tableau 2 et Tableau 3). Ces hypothèses se basent sur la littérature, des avis d'experts, des devis fournis par des fournisseurs et bureaux d'études (Spanner, Ankur, Corex, etc.) et l'expérience des auteurs.

TABLEAU 2 : HYPOTHESES DE CALCUL DU COUT DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE POUR LES SCENARIOS CFPPA

Caractéristiques techniques de l'installation	
Durée de fonctionnement	1 880 h /an ou 6 000 h/an
Puissance installée	30 kWé, ce qui correspond au dimensionnement de l'unité pilote
Facteur de charge	0,8
Charges fixes	
Investissement	Subventionnés à hauteur de 70 %
	Gazéifieur : 4500 €/kWé , soit 135 000 € pour 30 kWé Montage et installation du gazéifieur : 20 000 € Transport maritime et frais annexes du gazéifieur : 40 000 € Broyeur et séchoir solaire (avec transport) 65 000 € Travaux et construction de la plateforme (génie civil, voieries, bâtiments, divers) : 170 000 € Espace de stockage : uniquement pour les biomasses à récolte saisonnée (pailles de canne et canne fibre) et selon la quantité de biomasse nécessaire (voir Annexe 3). Coût d'investissement pour le stockage de 18 000 à 65 000€ selon les scénarios (114 à 412 m²). Pour les biomasses récoltées/fournies toute l'année, l'espace de stockage mensuel est compris dans l'investissement initial de la plateforme (besoin de 35m² maximum). Total : 440 000 € Granulateur : 52 000 € (transport compris)
Charges variables	
Charges de personnel	Divisé en deux postes : <ul style="list-style-type: none"> - surveillance et mise en route de la plateforme : 1,5h/j, 5j/sem, 47sem/an quelle que soit la capacité installée ou la durée de fonctionnement - préparation de la biomasse : pour 1880 h/an : 1j/semaine, 47sem/an ; pour 6000h/an 3j/semaine, 47sem/an Pour la ligne de pelletisation : pour 1 880h/an, 1j/semaine 47 sem/an ; pour 6 000h/an, 3j/semaine, 47sem/an (en substitution des charges de préparation de la biomasse) Coût-horaire du salaire, charges patronales incluses : 11,4 € (base SMIC, 35h, 30 % exonération de charges)
Frais de maintenance	Pour le gazéifieur : 0,023€/kWh (estimation SPANNER) auxquels ont été ajoutés 30% supplémentaires du fait de l'éloignement outre-mer, soit 0,0299€/kWh. Puis 2,5 % du montant de l'investissement pour le broyeur, le séchoir solaire et le pelletiseur (données IRENA et Valbiom)

Consommation électrique des auxiliaires	Prix du kWh : 0,12€/kWh HT Sans ligne de pelletisation : 39 % de consommation des auxiliaires Avec ligne de pelletisation : 37 % (voir Annexe 2) (à partir des estimations Bee&Co, 2015)
Achat de la biomasse	Le coût d'achat de la biomasse est calculé sur le prix moyen de marché bord-champ ou sortie usine pour les biomasses vendues <ul style="list-style-type: none"> - Bois d'Acacia : 60 €/m³, soit 52,2€/tMB, soit 104 €/tMS (prix de vente du bois bûche par l'ACCC) - Bois palette : 20 €/tMB (prix de vente moyen des stations de traitement des palettes) - Paille de la paille de canne : 60 €/tMB (15€ balle de 250 kg) (prix de vente moyen de la paille de canne avec coût de la prestation pour la mise en balle) Pour la canne fibre, la biomasse n'ayant actuellement pas de prix de marché, le prix de vente est calculé de façon à maintenir la marge brute bord-champ égale à celle de la canne à sucre <ul style="list-style-type: none"> - Canne fibre : 50€/t MB, soit 156€/tMS ; prix de vente permettant une marge brute de 3270€/ha, correspondant à rendement de 77t/ha et un prix d'achat de 46€/tMB de la canne à sucre (simulations SYPECAR 2015).
Coût de transport	d'après les hypothèses de calculs présentées ci-après en point 2.3.1.1
Elimination des cendres	Coût d'élimination des cendres = 121€/t cendres (IRENA 2012), Taux de cendre spécifique à chaque biomasse : <ul style="list-style-type: none"> - Bois palette : 1% MB (données ADEME, analyses Métal Réunion 2007) - Bois Acacia : 0,60 % MS (Energy research Centre of the Netherlands 2012) - Pailles de canne et canne fibre : 4,20 %MS (données Bagasse Energy research Centre of the Netherlands 2012)

TABLEAU 3 : HYPOTHESES DE CALCUL DU COUT DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE POUR LES SCENARIOS ACACIA ET PALETTE REGION

	Scénario Acacia Région	Scénario Bois Palette Région
Caractéristiques techniques de l'installation		
Durée de fonctionnement	6 000 h/an	6 000 h/an
Puissance installée	100 kWé	500 kWé
Facteur de charge	0,8	0,8
Charges fixes		
Investissement	Deux niveaux de subvention à l'investissement : 0% et 50 %	
	Gazéifieur : 3 000 €/kWé , soit 300 000 € pour 100 kWé Montage et installation du gazéifieur : 20 000 € Transport maritime du gazéifieur : 14 000 € Broyeur (avec transport) 30 000 € Travaux et construction de la plateforme (génie civile, voieries, bâtiments, unité séchage par co-génération) : 80 000€ (voir Annexe 6) Total : 444 000 €	Gazéifieur : 3 000 €/kWé , soit 1 500 000 € pour 500 kWé Montage et installation du gazéifieur : 20 000 € Transport maritime et frais annexes du gazéifieur : 40 000 € Broyeur (avec transport) 20 000 € Travaux et construction de la plateforme (unité de séchage par cogénération, génie civile, voieries, bâtiments, divers) : 150 300 € Total : 1 710 300 €
Frais financiers	8,5 %, emprunt sur 10 ans	
Charges variables		
Charges de personnel	Divisé en deux postes : <ul style="list-style-type: none"> - surveillance et mise en route de la plateforme : 1,5h/j, 5j/sem, 47sem/an - préparation de la biomasse : pour 6 000h/an 3j/semaine, 47sem/an Coût-horaire du salaire, charges patronales incluses : 11,4 € (base SMIC, 35h, 30 % exonération de charges)	
Frais de maintenance	Pour le gazéifieur : 0,023€/kWh (estimation SPANNER) auxquels ont été ajoutés 30% supplémentaires du fait de l'éloignement outre-mer, soit 0,0299€/kWh. Puis 2,5 % du montant de l'investissement pour le broyeur, le séchoir solaire et le (données IRENA)	
Consommation électrique des auxiliaires	Prix du kWh : 0,12€/kWh HT consommation électrique des auxiliaires : 32 % (voir Annexe 2)	
Achat de la biomasse	Prix de vente actuel du bois d'Acacia, format bûche vendu par l'ACCC : 110 €/m ³ MS, soit 55€/m ³ MB	Prix moyen de marché pour le bois palette : 20 €/tMB

Coûts de transport	d'après les hypothèses de calculs présentées ci-après en point 2.3.1.1	
Elimination des cendres	Coût d'élimination des cendres = 121€/t cendres (IRENA 2012), Taux de cendre bois d'Acacia : 0,6 % (Energy research Centre of the Netherlands 2012)	Coût d'élimination des cendres = 121€/t cendres (IRENA 2012), Taux de cendre bois palette : 1% (données ADEME, analyses Métal Réunion 2007)

2.3.2. Les coûts de transport

Une analyse spatiale est réalisée à l'aide du logiciel ArcGis®, afin de déterminer le coût de transport final entre les zones de production de biomasse et le CFFPA. Le coût est calculé en fonction du type de voie de circulation et du relief.

Les bases de données spatiales utilisées sont les suivantes :

TABEAU 4 : DONNEES SPATIALES UTILISEES POUR LE CALCUL DES COUTS DE TRANSPORT

Données spatiales	Source
Typologie des routes et voies de circulation	IGN TOPO 2012
Inventaire des peuplements d'Acacia mearnsii	Hauville, CIRAD 2005

Le coût de transport est basé sur le coût kilométrique, fourni dans le Schéma Directeur Bois énergie pour différents types de transport (Région Réunion 2014). Pour l'*Acacia mearnsii*, les coûts sont calculés pour un transport avec un camion-plateau, à 1,8€/t/km pour une vitesse moyenne de 30 km/h. Ce coût est ensuite pondéré selon la vitesse de déplacement (voir tableau suivant). Pour le bois-palette, le coût est calculé pour un camion-benne, à 1 €/t/km pour une vitesse moyenne de 50 km/h.

L'analyse spatiale consiste tout d'abord à découper l'espace en mailles 25m de côté, pour lesquelles un coût de franchissement de la maille est affecté selon le type de voie (Tableau 5). Une très forte valeur est attribuée aux mailles qui se situent en dehors des voies de circulation, afin de contraindre les itinéraires aux voies de circulation existantes.

TABEAU 5 : COUT DE TRANSPORT DES BIOMASSES SELON LE TYPE DE VOIES DE CIRCULATION

Type de voies de circulation	Vitesse de déplacement pour transporteur de biomasse (km/h)	Coût de transport (€/t/km)		Coût de franchissement d'une maille de 25m*25m (€/t/25m)	
		<i>Acacia mearnsii</i>	Bois palette	<i>Acacia mearnsii</i>	Bois palette
2*2 voies	70	0,8	0,7	0,019	0,018
Route à une chaussée	40	1,4	1	0,034	0,031
Route à deux chaussées	60	0,9	0,8	0,023	0,021
Route empierrée	20	2,7	2,5	0,068	0,063
Chemin	40	1,4	1,3	0,034	0,031
Bretelle de 2*2 voies	40	1,4	1,3	0,034	0,031
Hors voies circulation	/	/	/	68	63

La seconde étape consiste à affecter un coefficient de contrainte au déplacement pour chaque maille selon sa pente, en utilisant la formule de Eastman 1999 (Eastman 1999 in Chataigner et Barge 2004)

$C = 0,031p^2 - 0,025p + 1$ (avec p = pente en degré, C = contrainte de déplacement en %).

Par exemple, pour une pente de 30° (soit 58 %) le coefficient de contrainte est de 28 %. Pour le transport du bois d'Acacia, sur une voie de circulation de type « chemin » le coût de transport passe ainsi de 1,35 €/t/km à 1,73 €/t/km.

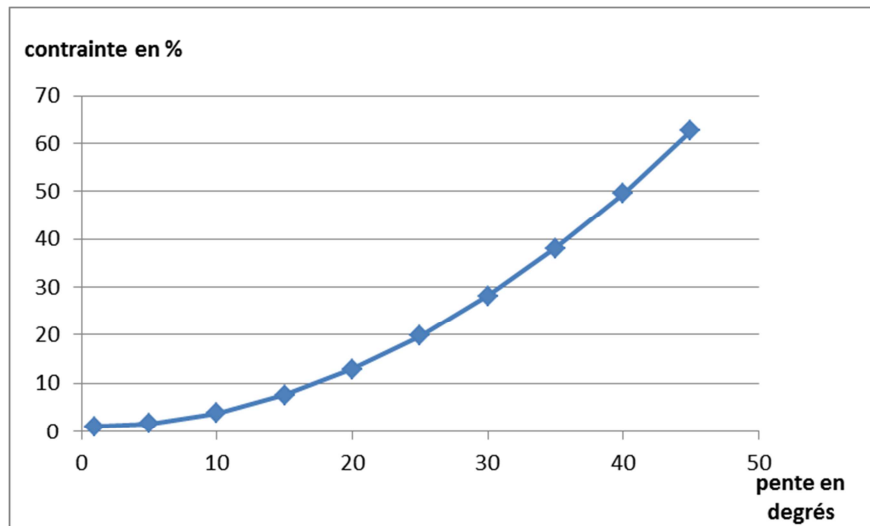


FIGURE 4 : CONTRAINTE DE DEPLACEMENT SELON LA PENTE

La dernière étape consiste à déterminer le coût total de déplacement à l'aide de la fonction « *cost distance* », qui fournit le coût cumulé depuis un lieu défini : le CFPPA dans le cas présent. Une analyse zonale permet enfin d'obtenir les coûts pour chaque lieu de production de biomasse : les centroïdes des peuplements d'Acacia, ou les deux lieux retenus de traitement de bois palette.

2.4. Évaluation environnementale par Analyse de Cycle de Vie

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale qui consiste à quantifier les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de production, communément désigné par l'expression « du berceau à la tombe ». Cette méthode est normée depuis la fin des années 1990 (ISO 14040 et 14044), bien qu'elle fasse encore aujourd'hui l'objet de nombreux développements. L'ACV repose sur trois principes généraux : 1/ une approche fonctionnelle : les impacts environnementaux sont rapportés à une unité fonctionnelle préalablement définie qui correspond au service rendu par le produit ou le service (1 kWh d'énergie produite, 1 km transporté etc.) ; 2/ une approche par cycle de vie et multicritère : les enjeux environnementaux considérés sont comptabilisés pour l'ensemble des étapes de vie du produit et ont pour objectif d'être le plus exhaustif possible des atteintes potentielles à l'environnement (incluant par exemple le réchauffement climatique, l'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux, la toxicité humaine, etc.) afin d'éviter les transferts de pollution 3/ la caractérisation quantifiée des impacts basée sur une modélisation scientifique des mécanismes environnementaux.

L'ACV sera réalisée en accord avec la norme ISO 14044, selon les 4 étapes suivantes :

- Définition de l'objectif et du champ de l'étude : qui consiste à définir les éléments préalables à l'étude, tels que la question posée par l'étude, l'application envisagée des résultats, le public visé pour la communication des résultats. Les systèmes sont définis, y compris les scénarios alternatifs à étudier, ainsi que leur portée géographique et temporelle. L'unité fonctionnelle est déterminée, elle correspond à l'unité à laquelle sera rapporté l'ensemble des indicateurs d'impact.
- Réalisation de l'inventaire : qui consiste à collecter, valider et traiter les données pour chaque élément du système selon les conventions énoncées à l'étape précédente. Ces données seront

quantifiées et reliées à l'unité fonctionnelle de référence de l'analyse. Elles correspondent à l'ensemble des flux entrant et sortant des systèmes définis, c'est-à-dire les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que les extractions de matières premières renouvelables et non renouvelables. Les données issues d'entretiens réalisés avec des personnes ressources ou issues d'études locales seront privilégiées, avant l'utilisation de la base de données ecoinvent, moins adaptée au contexte.

- Analyse de l'impact selon les préconisations du rapport européen ILCD (2011), concernant les méthodes d'analyse les plus consensuelles en ACV.
- Interprétation des résultats pour les différents scénarios, les types d'impacts environnementaux et les étapes de chaque scénario. Une analyse de sensibilité aux principales hypothèses de l'étude sera réalisée.

2.4.1. Définition des objectifs de l'ACV

L'évaluation environnementale réalisée dans le cadre du projet d'installation d'une plateforme de gazéification pour le CFPPA de Piton Saint-Leu répond aux objectifs globaux suivants :

- Evaluer les impacts environnementaux, par ACV, de différents scénarios de gazéification sur l'île de la Réunion, en identifiant dans chaque cas les principales sources d'impacts ;
- Evaluer l'intérêt environnemental de la gazéification par rapport au mix électrique de la Réunion et dans l'objectif de substituer les importations d'énergies fossiles (charbon et fioul).

Les objectifs secondaires sont de :

- Comparer différents scénarios de gazéification pour le CFPPA ; cette comparaison ne sera pas réalisée pour les scénarios à l'échelle régionale, car les objectifs poursuivis dans ces scénarios et le modèle de filière notamment la puissance installée, sont différents.

Dans ce cadre et selon les recommandations de la plateforme européenne de l'ILCD (International Reference Life Cycle Data System), les objectifs principaux et secondaires s'inscrivent dans un objectif général de fournir des éléments d'aide à la décision, visant à évaluer l'intérêt environnemental d'intégrer la valorisation énergétique de la biomasse par gazéification dans le mix électrique de la Réunion.

Il doit être noté que cette analyse ne fournit pas l'ensemble des éléments nécessaires à cette prise de décision. La présente analyse vise à évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie de l'électricité produite par gazéification, étendu aux conséquences d'utilisation des ressources. Elle ne prend pas en compte les changements potentiels sur les modes de consommation de l'énergie, ni les effets induits par l'installation d'unités locales de production d'énergie. En effet, il est probable que l'installation d'une unité décentralisée de production d'énergie conduise à une nouvelle demande en énergie, par exemple à la création de nouvelles activités artisanales ou industrielles, ou à l'installation d'équipements permettant d'améliorer le confort des habitants (climatisation ou chauffage). Concernant l'objectif principal de comparaison des performances environnementales de la gazéification au mix électrique, aucun changement structurel des outils de production du mix électrique ne seront pris en compte. En effet, l'étude se limite à la mise en place de scénarios qui concernent de faibles puissances de gazéification (de 30 kWé à 500kWé). La comparaison avec le mix électrique est donc réalisée selon l'hypothèse que « toutes choses sont égales par ailleurs ». En revanche, un développement plus important de telles filières (pour une substitution de la totalité du charbon importé par exemple) pourrait entraîner des effets structurels et des effets indirects importants : impacts potentiels sur les filières agricoles (concurrence sur la ressource fourragère avec les filières d'élevage), modifications de l'appareil de production (modifications techniques des centrales thermiques, etc.), effets rebonds sur la collecte des déchets ou sur la consommation électrique. Cette étude se concentre sur une mobilisation de ressources et une production d'électricité marginales par rapport à la situation actuelle et ne prend donc pas en compte de

tels effets structuraux, qui nécessiteraient une analyse approfondie intégrant une prospective économique et territoriale.

Dans ce cadre, les effets structuraux des scénarios de gazéification pour le CFPPA et pour la région sont supposés négligeables. D'après le rapport ILCD, ces scénarios correspondent à une situation de type « A » (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2011), c'est-à-dire à un objectif d'aide à la décision dont les conséquences sont marginales en dehors des systèmes étudiés.

Pour chaque scénario, le système doit ensuite être délimité afin d'identifier les activités à prendre en compte. Le rapport ILCD préconise de procéder à une modélisation attributionnelle du système, c'est-à-dire de ne considérer que les impacts liés au cycle de vie de la fonction d'intérêt (production d'électricité par gazéification), sans prendre en compte d'effets sur d'autres systèmes productifs : ressource, transport, transformation, etc. Cependant, et toujours selon les recommandations ILCD, afin de répondre au mieux à l'objectif d'aide à la décision, les limites du système pourront être élargies afin de prendre en compte les cas de multi-fonctionnalité, voire les concurrences d'usage.

Notamment, la mobilisation de la ressource intégrera les conséquences de sa valorisation énergétique par rapport à un scénario prospectif sans valorisation énergétique. Par exemple, les impacts environnementaux de la valorisation énergétique du bois de palette seront comparés à un scénario prospectif d'élimination des palettes déclassées. Le scénario prospectif s'appuie sur des éléments de contexte : dans cet exemple en absence de débouché, une quantité non négligeable des palettes est brûlée sans autorisation et une autre partie est stockée sans être évacuée. On suppose qu'en absence d'actions ciblées sur la filière palette, la combustion des palettes sera maintenue. Les émissions du scénario prospectif seront donc déduites du scénario de valorisation énergétique, afin de comptabiliser les émissions évitées par la mise en place de la valorisation énergétique de cette biomasse. La construction des scénarios prospectifs et de valorisation énergétique, tiennent compte du contexte socio-économique local, des documents de planification régionale (notamment sur l'extension des surfaces ou des productions agricoles) et est validée avec les personnes ressources du projet.

2.4.2. Définition de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle choisie est le kWh produit, injecté sur le réseau. Chaque impact environnemental sera donc exprimé par kWh produit et chaque système sera comparé sur cette base.

Les autres éléments méthodologiques concernant la définition des systèmes de référence et d'analyse seront présentés en partie résultat.

2.4.3. Sélection des indicateurs

La méthode d'impact choisie est celle préconisée par l'ILCD. Seuls les indicateurs classés par l'ILCD pour la qualité des méthodes d'évaluation ont été retenus (voir Annexe 13 pour une description succincte des impacts). Cette étude propose une classification allant de 1 à 4 selon la validité scientifique de l'indicateur. Les indicateurs classés 3 et 4, c'est-à-dire les niveaux de notation classés comme « recommandé, mais à appliquer avec précaution » et « trop immature pour être recommandé » ont été exclus. Les indicateurs peuvent donc être classés selon leur niveau de validité et leur échelle géographique (tableau), ce qui en facilite l'interprétation des résultats.

TABLEAU 6 : INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX RETENUS

Indicateur	Niveau de validité selon l'ILCD	Echelle d'impact	Description de l'indicateur	Unité
Changement climatique	1	Globale	Emission de gaz à effet de serre (GES), forçage radiatif sur horizon temporel de 100 ans, IPCC 2007	kg CO2 eq
Destruction de la couche d'ozone	1	Globale	Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (<i>Ozone Depletion Potential ODP</i>), sur un horizon de temps de 100 ans, World Meteorological Organization 1999.	kg CFC eq
Emissions de particules	1	Locale	Quantification des décès prématurés causés par les émissions de particules, par émissions de PM 2,5 (particules < 2,5µm) Rabl et Spadaro 2004	kg PM2.5-eq
Effet des radiations ionisantes sur la santé humaine	2	Régionale	Quantifie l'impact des radiations ionisantes sur la santé humaine par émission d'uranium 235, Frischknecht et al 2000	kg Bq U235 eq
Epuisement des ressources minérales et fossiles	2	Globale	Raréfaction des ressources minérales exprimées selon les réserves de base de chaque élément, rapporté par unité d'antimoine (Sb), Van Oers et al 2002	kg Sb eq
Formation d'ozone photochimique	2	Locale	Potentiel de contribution à la formation d'ozone photochimique, Van Zelm et al 2008	kg COVNM eq (Composé Organique Volatile Non Méthanique)
Acidification	2	Régionale	Excès cumulé de charges acidifiantes (H+) dans un milieu sensible (Accumulated Exceedance (AE)) Seppälä et al 2006 et Posch et al 2008	H ⁺ eq
Eutrophisation terrestre	2	Régionale	Excès cumulé de charges eutrophisantes (azote) dans un milieu sensible (Accumulated Exceedance (AE)) Seppälä et al 2006 et Posch et al 2008	N eq
Eutrophisation en eaux douces	2	Régionale	Quantité de phosphate atteignant les eaux de surface, ReCiPe version 1.05	kg P eq
Eutrophisation marine	2	Régionale	Quantité d'azote atteignant les eaux marines, ReCiPe version 1.05	kg N eq
Toxicité humaine non cancérigène	2/3	Locale	Augmentation de la morbidité de la population humaine par unité de substances chimiques émises, USEtox	CTUh (Comparative Toxic Unit for humans)
Toxicité humaine cancérigène	2/3	Locale	Augmentation de la morbidité de la population humaine par unité de substances chimiques émises, USEtox	CTUh (Comparative Toxic Unit for humans)
Ecotoxicité en eaux douces	2/3	Locale	Fraction d'espèces affectées par l'émission d'un composé chimique, USEtox	CTUe (Comparative Toxic Unit for ecosystems)

échelle de notation JRC :

1 : recommandé et satisfaisant

2 : recommandé, mais quelques améliorations requises

3 : recommandé, mais à appliquer avec précaution

Source : adapté de EC-JRC 2011.

Pour les indicateurs relatifs à la toxicité (toxicité humaine cancérigène et non cancérigène), les résultats montrent que les impacts sont principalement causés par les métaux. Or, l'incertitude est forte

concernant le devenir des métaux concernant la fraction des métaux réellement toxique⁴. Une deuxième analyse sera donc effectuée, avec la méthode USEtox sans prise en compte des métaux, afin d’apporter des éléments d’analyse supplémentaires concernant les autres substances toxiques émises.

2.4.4. Analyse de contribution des impacts

Pour chaque scénario et pour chaque catégorie d’impact, les étapes du cycle de vie qui contribuent le plus à l’impact seront identifiées et quantifiées. Les principales substances responsables de l’impact seront également identifiées.

2.4.5. Grille de comparaison des impacts

La comparaison des impacts environnementaux des différents scénarios par rapport aux impacts du charbon ou du mix électrique nécessite d’identifier l’existence d’une différence significative entre deux niveaux d’impact. Une grille d’analyse a donc été conçue à partir des indications fournies par Jolliet et al (2010), où la différence entre deux impacts est jugée significative selon l’échelle des conséquences de l’impact (globale, régionale ou locale) (Tableau 7). Par exemple, pour un impact environnemental d’échelle globale (comme le changement climatique), une différence d’au moins 10 % entre deux niveaux d’émission de GES est suffisante pour que l’on considère que les résultats soient différents.

TABLEAU 7 : SEUILS DE SIGNIFICATION POUR LA COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Échelle de l’impact	Différence significative
Globale	+/- 10 %
Régionale	+/- 30 %
Locale	+/- 90%

Nous proposons de décliner ces seuils en 5 classes de comparaison permettant de juger si un impact est plus ou moins polluant qu’un scénario de référence, ici le charbon ou le mix électrique (Figure 5). Le passage de la classe « plus/moins polluant » à la classe « nettement plus/moins polluant » a été fixé à 3 fois la valeur seuil proposée par Jolliet et al.

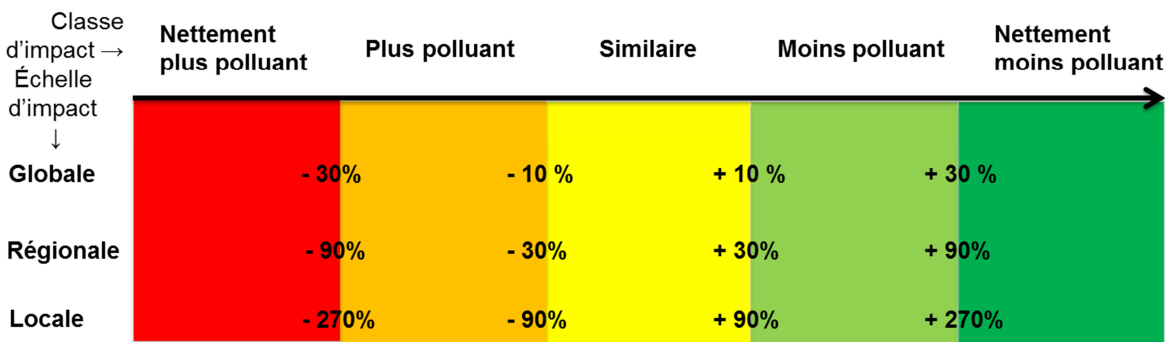


FIGURE 5 CLASSES D’IMPACT POUR LA COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES SCENARIOS PAR RAPPORT AUX IMPACTS DU CHARBON OU DU MIX ELECTRIQUE

⁴ Effet relatif à la « spéciation » des métaux, c’est-à-dire leur répartition selon leurs différentes formes chimiques possibles. Seule la fraction soluble sous forme d’ions libres devient bio-accessible, et par conséquent toxique pour les êtres vivants. Cette spéciation dépend notamment du type de sol, du pH, de la température et des types de métaux. Actuellement, la spéciation n’est pas intégrée dans la version de la méthode USEtox utilisée dans cette étude.

L'intérêt de cette grille d'analyse est d'obtenir une lecture rapide et simplifiée pour la comparaison des impacts par rapport au charbon ou au mix électrique. Cependant, il convient de souligner que cette grille relève d'une logique mathématique par le passage d'une catégorie à l'autre et ne représente donc pas les différences d'impacts dans toute leur complexité (voir Annexe 15 à Annexe 17 pour une lecture complète des impacts).

Les impacts environnementaux du mix électrique Réunion sont calculés à partir des bases de données ecoinvent et de la composition du mix électrique 2014 (BER 2014)⁵. Les procédés utilisés pour chaque type d'énergie correspondent à des données françaises normalisées (Annexe 14). Par manque d'information, les spécificités des unités de production d'électricité de l'île de la Réunion (centrales thermiques, hydroélectrique, etc.) n'ont pas pu être intégrées au modèle. Une analyse de sensibilité sera donc menée (§ 3.4.3.4.1), sur les impacts sur le changement climatique uniquement pour lequel des données sont publiées (Energie Réunion SPL et OER 2015).

⁵ A noter que la valeur des émissions de CO₂ du mix électrique Réunion fournie dans le BER 2014 n'a pas pu être intégrée dans la modélisation en absence de données suffisantes permettant de calculer l'ensemble des impacts environnementaux pour le mix électrique ou l'électricité issue du charbon. En revanche, une analyse de sensibilité sera conduite afin d'évaluer l'influence de ces données sur l'interprétation des résultats (§3.4.3.4.1).

3. Résultats

3.1. Evaluation de la disponibilité de biomasses pour la plateforme du CFPPA

Les biomasses évaluées se classent selon quatre catégories : les ressources bois actuellement produites sur l'île, les résidus agricoles, les biomasses issues de la filière déchet et les cultures dédiées à l'énergie actuellement non produites sur l'île.

La réglementation en vigueur concernant l'utilisation de déchets ligneux pour une valorisation énergétique par combustion (ou gazéification) sera présentée dans un premier temps. Puis, les potentiels théoriques, disponibles et mobilisables seront évalués selon la méthodologie présentée ci-dessus.

3.1.1. Le point sur la réglementation

La nouvelle réglementation⁶, relative aux installations de combustion classées sous la rubrique ICPE 2910 est entrée en vigueur au 1^{er} janvier 2014. Tout d'abord, la définition de la biomasse est modifiée, introduisant une distinction entre biomasse d'origine agricole ou forestière d'une part et déchets et d'autre part. La biomasse est définie de la façon suivante :

« a) Les produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique ;

b) Les déchets ci-après :

(i) Déchets végétaux agricoles et forestiers ;

(ii) Déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée ;

(iii) Déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont coïncinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée ;

(iv) Déchets de liège ;

(v) Déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogènes ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, y compris notamment les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition. »

« La biomasse pouvant être utilisée dans les installations visées par le présent arrêté⁷ est restreinte à la biomasse telle que définie au a ou au b (i) ou au b (iv) de la définition de biomasse, des produits connexes de scierie issus du b (v) de la définition de biomasse ou lorsque la biomasse est issue de déchets au sens de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement ».

Ensuite, cette nouvelle réglementation introduit la possibilité d'utilisation du bois d'emballage en fin de vie à condition qu'il ait fait l'objet d'une sortie de statut de déchet. Cette démarche doit être réalisée par les plateformes de traitement des bois d'emballage et comprend la mise en place d'une démarche de qualité et de contrôle (identification d'une zone de déchargement du bois distincte de la zone de stockage, système de gestion de la qualité, formation du personnel, analyses chimiques sur des échantillons de broyat 2 à 4 fois par an selon la capacité de la plateforme, émission d'une attestation de conformité à la SSD pour chaque lot expédié) (CIBE 2014; Inddigo 2014).

⁶ Arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910

Arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910

Arrêté du 24 septembre 2013 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2910-B de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement

⁷ Installations de combustion classées sous la rubrique 2910

Enfin, un régime d'enregistrement, moins contraignant que le régime d'autorisation, a été ajouté pour les installations de 0,1 à 20 MW (voir annexe 1). Selon les cahiers des charges, la plateforme de gazéification du CFPPA aura une puissance installée de 20 à 40 kWé, ce qui la positionne en dehors des seuils de classement ICPE (à partir de 0,1 MW).

Cette nouvelle réglementation permet officiellement l'utilisation du bois d'emballage dans les installations de combustion. Les biomasses telles que les palettes ou les déchets ligneux des stations de traitement des déchets verts pourront donc être retenues. Etant donné les exigences de la procédure de sortie de statut de déchet à réaliser pour l'utilisation de ces biomasses dans les filières énergétique, seuls les acteurs disposant d'une installation ICPE seront retenus pour approvisionner la plateforme de gazéification.

3.1.2. La ressource bois existante

3.1.2.1. Bois de taille des vergers du lycée de St Paul

3.1.2.1.1. Potentiel théorique

Productivité

Le lycée agricole de St Paul dispose d'un verger de manguiers de 7 ha, d'une densité de 220 pieds/ha environ. Ces derniers sont taillés après la récolte des fruits (janvier, février), à raison d'une taille tous les deux ans environ. A noter que les épisodes cycloniques des dernières années ont conduit à l'augmentation ponctuelle des résidus de bois sur le verger.

En absence de mesures réalisées au niveau du lycée ou par les différentes structures d'appui (Chambre d'agriculture, AROP-PF) et de recherche (CIRAD) en agriculture à la Réunion pour évaluer la quantité de bois dégagée par opération de taille, nous considérerons les données d'une expérimentation menée en Thaïlande, avec 9,6 kgMB/arbre (Nagle et al. 2007). Ces données sont néanmoins difficilement applicables dans d'autres contextes, car la quantité de bois issue de la taille dépend à la fois de la variété utilisée et donc de la croissance ligneuse des arbres, de l'âge et de la conduite du verger, ainsi que de la pratique de taille qui est très variable. L'évaluation de la productivité pour cette biomasse est donc réalisée à titre indicatif et devra être approfondie avec des mesures lors des prochaines opérations de taille si les scénarios d'approvisionnement de l'unité de gazéification s'avèrent intéressants.

En considérant que la moitié du verger est taillée chaque année, la quantité de biomasse ligneuse produite est de 1,1 t/ha, soit un total de 7,4 tMB pour les 7 ha. Avec un taux d'humidité de 51% (Nagle et al 2007), la quantité de matière sèche disponible est alors de **3,6 tMS/an**.

Réglementation et droits d'accès

Le bois de taille est considéré comme une biomasse, à ce titre il n'y a pas de contrainte réglementaire à son utilisation pour un débouché énergétique.

Usages concurrents

Le lycée est propriétaire de la biomasse produite sur son exploitation. Actuellement le bois de taille est déposé en bordure de route pour un enlèvement par les services de traitement des déchets verts. Il n'y a donc pas d'usage concurrent sur cette biomasse.

3.1.2.1.2. Potentiel disponible

Le potentiel disponible correspond à la totalité du potentiel théorique, soit **3,6tMS/an**.

3.1.2.1.3. Potentiel mobilisable

La taille des vergers est réalisée par un prestataire. L'ensemble du verger est accessible aux activités de taille. Le bois de taille est ensuite regroupé en bord de verger, ce qui ne pose pas de limite technique à un usage énergétique. Le potentiel mobilisable est donc égal au potentiel disponible, soit **3,6 tMS/an**.

3.1.2.2. Bois d'élagage du lycée de St Paul

3.1.2.2.1. Potentiel théorique

Productivité

Le lycée de Saint Paul a signé un contrat visant à suivre les mesures agro-environnementales territorialisées (MAET) pour le maintien des haies sur son espace agricole. Il s'est engagé en 2011 sur une longueur de haie de 4,13 km et pour laquelle il perçoit une subvention de 1,33€/m linéaire pour le maintien de ces haies, pour une durée de 5 ans.

D'après les données fournies par l'IFN à la demande de l'ADEME dans le cadre d'une évaluation de la quantité de biomasse issues des haies et alignements en métropole ; la biomasse ligneuse dégagée lors de la taille de ces haies arbustives est estimée à 8,5 MAP MS/km/an⁸ (IFN, FCBA, et SOLAGRO 2009). Selon ces mêmes estimations, le ratio Bois d'Industrie et Bois Energie (BIBE⁹) et Menu Bois (MB)¹⁰ est de 0,65/0,35, ces deux catégories pouvant être valorisées sous forme énergétique. La production de bois d'œuvre à partir de haies est considérée comme nulle. A défaut de mesures effectuées spécifiquement à la Réunion, nous retiendrons ces données, bien que la productivité ligneuse soit probablement plus élevée sous le climat tropical de la Réunion.

Le potentiel théorique s'élève donc à 35 MAP/an, soit **13m³/an, soit 7,5 tMS/an¹¹**.

Réglementation et droits d'accès

Comme pour la biomasse ligneuse issue de la taille des manguiers, il n'y a pas de contraintes réglementaires ou d'accès à l'utilisation de cette biomasse pour un débouché énergétique.

Usages concurrents

Le bois de taille des haies est actuellement élagué par un prestataire indépendant qui collecte ensuite le bois. L'usage de cette biomasse n'étant pas clairement identifié, nous considérerons qu'il est alors possible d'envisager une contractualisation avec le prestataire et une rémunération pour son service afin de conserver la biomasse élaguée, sans léser le prestataire.

3.1.2.2.2. Potentiel disponible

Le potentiel disponible est égal à 100% du potentiel théorique, soit **7,5 tMS/an**.

⁸ MAP = mètre cube apparent ; 1 m³ de bois de bocage = 2,7 MAP (IFN, FCBA, et SOLAGRO 2009), voir glossaire pour la définition.

⁹ « Ce compartiment est défini comme la somme de trois composantes : (1) la biomasse de la tige comprise entre la découpe commerciale bois d'œuvre et la découpe bois fort (7 cm), (2) la biomasse de la tige de dimension bois d'œuvre mais dont l'usage potentiel ne peut être le bois d'œuvre en raison de limites sur la qualité du bois, (3) la biomasse comprise dans les branches jusqu'à la découpe bois fort (7 cm). » (IFN, FCBA, et SOLAGRO 2009)

¹⁰ Menu bois (MB) : « Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse de la tige et des branches comprise dans les bois de diamètre inférieur à 7 cm. Autre appellation possible pour ce compartiment : menus bois de diamètre fin bout inférieur à 7 cm potentiellement valorisables sous des formes énergétiques.

¹¹ masse volumique de la ressource ligneuse bocagère = 0,50tMS/m³ (Bouvier 2008, in IFN 2009).

3.1.2.2.3. Potentiel mobilisable

Les haies sont élaguées par un prestataire. La biomasse peut être collectée directement sur site puis transportée pour une phase de séchage pendant quelques mois, afin d'abaisser l'humidité de la biomasse et de permettre une séparation naturelle de la biomasse végétale et ligneuse. Le potentiel mobilisable ne comporte pas de contrainte particulière, il sera donc égal à 100% du potentiel disponible, soit 7,5 tMS/an.

3.1.2.3. Bois de coupe issu des forêts publiques

3.1.2.3.1. Potentiel théorique

Productivité

Sur les 100 515 ha gérés par l'ONF, seuls 3 500 ha sont dédiés à la production de bois (ONF 2015). Face au très faible nombre d'exploitants forestiers, l'ONF exploite principalement en régie et vend donc les bois façonnés en bord de route. En 2014, les volumes exploités sont de 7 700 m³ de bois/an, issus de plantations de cryptomeria (*Cryptomeria japonica*) et 200 m³/an issus de plantations de tamarins (*Acacia Heterophylla*)(données ONF 2014).

TABLEAU 8 : PRODUCTIVITE DES PRODUITS FORESTIERS DES PLANTATIONS ONF DE CRYPTOMERIA ET DE TAMARIN (ONF 2011)

Espèce	Age de la plantation	rendement théorique (m ³ /ha)	bois 1 ^{er} choix (m ³ /ha)	%	Bois 2 ^e choix (m ³ /ha)	%	Bois énergie (m ³ /ha)	%
Cryptomeria	25-39 ans	350	35	10	140	40	175	50
	40-40 ans	500	200	40	150	30	150	30
Tamarin	25-39 ans	150	0	0	0	0	150	100
	40-54 ans	200	0	0	40	20	160	80
	55-69 ans	250	25	10	75	30	150	60

En considérant une exploitation constante des futaies de cryptomeria de l'ONF et à partir de la répartition des produits forestiers en fonction de l'âge des plantations (ONF 2011 et PER), la part moyenne de bois énergie sur l'exploitation de futaies de cryptomeria est de 40 %. Le potentiel théorique s'élève donc à 5 133 m³/an, soit **4 312 t/an** (à 50% humidité).



PHOTOGRAPHIE 1 : GRUMES (BOIS D'ŒUVRE) DE CRYPTOMERIA SUR PLANTATION ONF (AUDOUIN 2015) PHOTOGRAPHIE 2 : PRODUITS CONNEXES DEGAGES CRYPTOMERIA APRES EXPLOITATION DE CRYPTOMERIA (AUDOUIN 2015)



PHOTOGRAPHIE 3 : PLAQUETTES FORESTIERES DE CRYPTOMERIA, COPOBOIS (AUDOUIN 2015)

Réglementation et droits d'accès

Afin de s'assurer du maintien de la couverture du sol et de l'apport de matière organique, les rémanents (diamètre < 7 cm) sont laissés au sol, conformément à la norme ISO 14 001. La fraction disponible pour une valorisation énergétique correspond donc uniquement aux bois de diamètre compris entre 7 et 18 cm.

Usages concurrents

Le bois d'œuvre est vendu bord de route, essentiellement à la Scierie de Bourbon pour une valorisation en ébénisterie et en bois de construction.

Faute de débouchés, les produits connexes¹² (diamètre compris entre 7 et 18 cm) sont peu valorisés, ce qui constitue un manque à gagner pour l'ONF, qui souhaiterait donc une valorisation complémentaire. Actuellement, seuls 8% des produits connexes sont prélevés au moment de la coupe des plantations de cryptomeria, soit 589 m³/an (données ONF 2014).

La majeure partie de ces produits connexes est actuellement collectée par la société COPOBOIS qui les transforme en copeaux de bois, essentiellement vendus pour un débouché en litière animale. La demande

¹² Voir glossaire

de l'île pour ce type de produit est estimée à 450 m³/an (étude PER). Cette société souhaite également se positionner sur le marché du bois énergie et diversifier ainsi ses produits, avec la plaquette forestière par exemple.

3.1.2.3.2. Potentiel disponible

La majeure partie du potentiel disponible correspond donc aux produits connexes issus de plantations de cryptomeria et dans une moindre mesure à celui issu de l'exploitation des plantations de tamarin.

	Cryptomeria
Volume bois d'œuvre exploité par l'ONF (m ³ /an)	7 700
Volume de bois à débouché énergétique (diamètre compris entre 7 et 18 cm) (m ³ /an)	5 133
Usages concurrents (litière animale) (m ³ /an)	450
Potentiel disponible (m ³ /an)	4 683
Potentiel disponible H 50% (tMB/an)	3 746

3.1.2.3.3. Potentiel mobilisable

Le potentiel disponible est calculé à partir des volumes de bois d'ores et déjà mobilisés par l'ONF et selon les contraintes techniques de l'ONF, ce qui correspond à un potentiel mobilisé. Lors des coupes rases, le bois est généralement sorti de la parcelle, ramené bord de route afin d'effectuer le billonnage qui permet de séparer les bois d'œuvre des produits connexes. Les produits connexes sont donc concentrés en bord de route et facilement collectables avant transport. Le potentiel mobilisable sera donc égal au potentiel disponible, soit 3 746 tMB/an, soit **1 873 tMS/an**. Il est à noter que le faible nombre d'exploitants forestiers et la faible structuration de ce secteur sont des éléments de contrainte qui peuvent réduire le potentiel mobilisable de façon conséquente.

3.1.2.4. Bois d'Acacia issu du défrichement

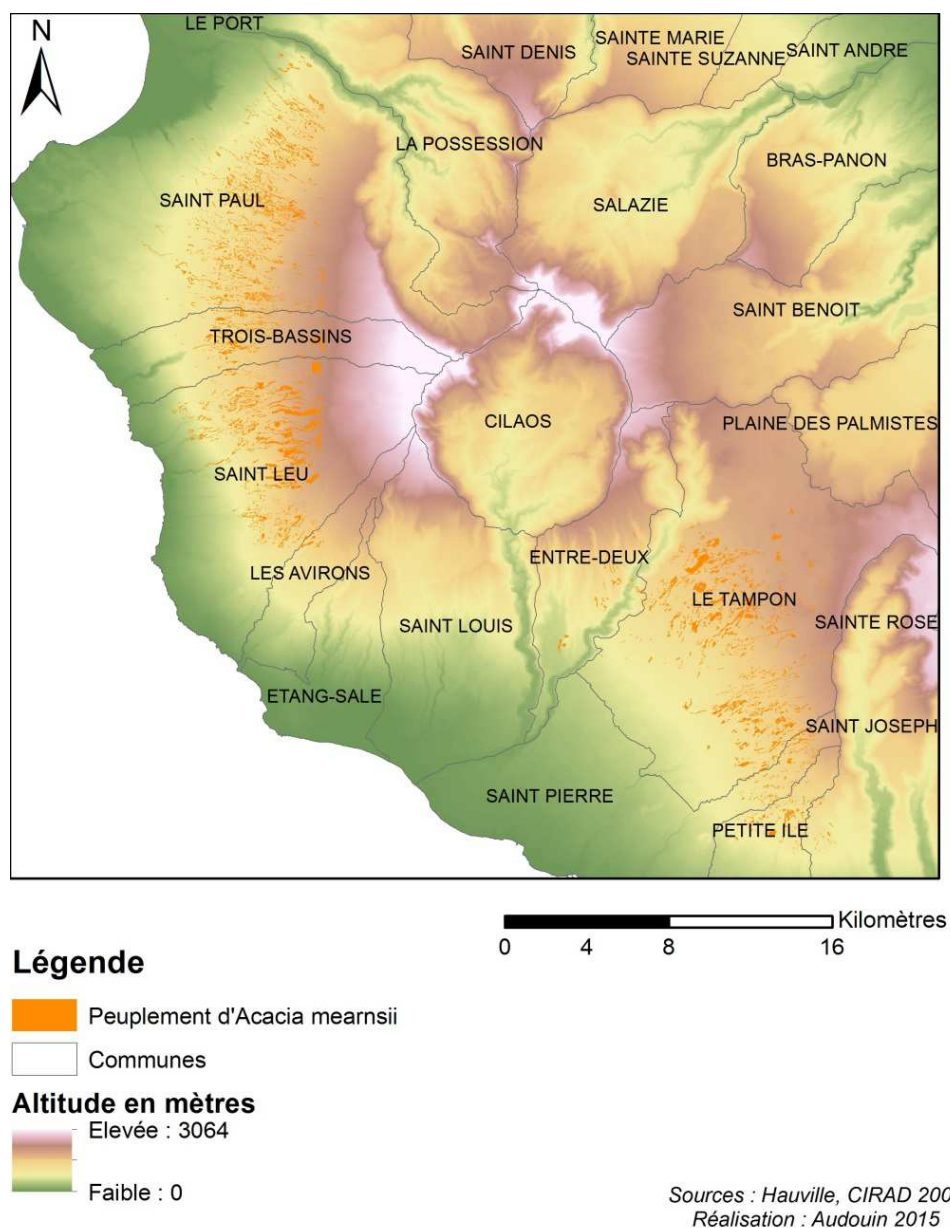
3.1.2.4.1. Potentiel théorique

Productivité

L'inventaire des peuplements d'Acacia réalisé par J. Tassin en 2002 s'élève à 5 500 ha. Une étude réalisée par Hauville (2007) en 2007 à partir de photos aériennes de 2003 évalue ces surfaces à la baisse avec 2 378 ha. Les peuplements se situent principalement dans les Hauts de l'Ouest (communes de Saint-Paul, Trois-Bassins et Saint-Leu), ainsi que dans la commune du Tampon (voir carte ci-dessous), dont 136 ha situés dans le domaine géré par l'ONF.

Or, l'inventaire réalisé par l'ONF en 2012 suite aux incendies de 2011 au niveau du massif du Maïdo, évalue à 155 ha les surfaces d'*Acacia mearnsii* non brûlées et 108 ha de régénération naturelle d'*Acacia mearnsii* sur les surfaces brûlées (inventaire 2012, ONF). Nous privilégierons ces données, plus récentes, uniquement sur la zone gérée par l'ONF en substitution des 136 ha identifiés par l'étude de Hauville (2007). La superficie totale théorique des peuplements d'Acacia s'élève donc à 2 505 ha.

Par ailleurs, s'il n'est pas effectué de replantation sur les peuplements de tamarin ou de cryptomeria incendiés, la colonisation d'*Acacia mearnsii* pourrait représenter un potentiel supplémentaire de 130 ha, soit 14 950 tMS (inventaire ONF, 2012). Cette dernière estimation n'a cependant pas été prise en compte dans l'évaluation du potentiel théorique.



CARTE 1 : LOCALISATION DES PEUPEMENTS D'*ACACIA MEARNsii*

Dans la littérature, les données de productivité des peuplements d'*Acacia mearnsii* sont variables. Elle a été évaluée à 12 à 14 tMS/ha/an (20m³/ha/an) par Tassin. L'ONF estime une productivité moyenne des peuplements à 150 m³/ha, valeur qui est reprise dans le Schéma Directeur Bois Energie de la Réunion (2014) avec une productivité de 115 tMS/ha. A partir de relevés sur des peuplements d'âges différents (tableau suivant), Hauville (2005) estime une productivité moyenne de 272,3 tMB/ha, soit 136 tMS/ha avec une humidité de 50%.

TABLEAU 9 : ÉVALUATION DE LA PRODUCTIVITE DES PEUPELEMENTS D'*ACACIA MEARNSII* (HAUVILLE, CIRAD 2005)

Age des peuplements d' <i>Acacia mearnsii</i>	Productivité moyenne (tMB/ha)	Productivité (tMS/ha) avec taux d'humidité sur matière brute de 50%
< 5 ans	85,3	42,65
5-10 ans	319	159,5
> 10 ans	329	164,5

Sources : Hauville, CIRAD (2005)

Nous retiendrons la valeur basse de ces différentes estimations, soit 115tMS/ha. Avec une superficie estimée à 2 505 ha, le potentiel théorique s'élève à **288 075 tMS** sur pied.



PHOTOGRAPHIE 4 : FLORAISON D'*ACACIA MEARNSII* (AUDOUIN 2015)



PHOTOGRAPHIE 5 : EN SECOND PLAN, PEUPELEMENT D'*ACACIA MEARNSII* DANS LES HAUTS DE L'OUEST (HAUVILLE 2005)

Réglementation et droits d'accès

L'arrêté préfectoral n°3006 relatif aux Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales de la Réunion (BCAE) fait figurer l'*Acacia mearnsii* comme espèce exotique envahissante (EEE). La plantation d'*Acacia mearnsii* est donc interdite et les agriculteurs sont tenus de lutter contre cette espèce, notamment sur les zones de culture¹³ ou aux abords des ravines si la zone a été auparavant mise en culture ou en haies¹⁴. Les activités de plantation ou d'exploitation ne sont donc pas éligibles aux subventions. Le potentiel disponible ne pourra pas se baser sur des activités de plantation de cette espèce, mais sur son exploitation visant à assainir les espaces envahis, au moyen de coupes régulières.

Usages concurrents

La filière bois énergie est très peu structurée à la Réunion. La consommation de bois d'*Acacia mearnsii* est limitée aux filières informelles pour une demande de bois de cuisson, bois de chauffe, ou de bois pour les cérémonies religieuses (cérémonies tamoul de marche sur le feu par exemple).

¹³ <http://www.daaf974.agriculture.gouv.fr/Domaine-BCAE-IV-Entretien-des>

Anomalie caractéristique : « Présence d'espèces envahissantes sur plus de 5 % des surfaces portant des espèces ligneuses ou en fructification, ou sur plus de 20 % des surfaces portant des cultures herbacées ou lianescentes ».

¹⁴ <http://www.daaf974.agriculture.gouv.fr/Domaine-BCAE-I-1-Erosion-Structure>

Cependant, une **demande en bois bûche** identifiable concerne les projets de construction de logements sociaux de la SODEGIS qui se basent sur un chauffage au bois (insert). L'approvisionnement de ces logements a été estimé à 822 steres/an, soit 480 tMS/an, dont 255 tMS à partir d'*Acacia mearnsii* et 225 tMS à partir de Tamarin (*Acacia heterophylla*) (Schéma Directeur Bois Energie, 2014). L'approvisionnement n'est pas contractualisé mais le bois provient principalement du domaine ONF.

L'Association citoyenne contre le chique (ACCC) est une structure qui vise à la formation de **bûcherons** et d'élagueurs au moyen d'ateliers chantier d'insertion (ACI). Par une convention avec l'ONF, l'association a exploité 20 ha en 2014 dans les zones incendiées, constitué de Tamarin et d'*Acacia mearnsii*. L'association vend ensuite le bois sous forme de bois bûche aux détaillants dans toute l'île à partir de sa plateforme de stockage située au Guillaume dans les Hauts de l'Ouest.

De plus, il existe une faible activité de **charbonnage** pour le débouché domestique (3 charbonniers recensés dans l'Ouest). Leur consommation de bois est estimée à 500 m³/an, soit 350 t/an (Schéma Directeur Bois Energie). Le bois provient généralement de coupe d'*Acacia* par convention avec l'ONF. L'ACCC a également pour projet la production de charbon, mais les volumes envisagés (jusqu'à 3500 t bois qui fourniraient 800 t /an de charbon) ne seront pas pris en compte dans le potentiel disponible, puisque le projet est trop peu avancé et que la ressource bois viendrait se substituer en partie à celle utilisée pour le débouché bois-bûche.

Afin de ne pas priver la ressource utilisée par la SODEGIS et par les charbonniers, **650 tMS/an** seront retranchées au potentiel théorique, à partir des surfaces ciblées sur le domaine ONF. Le bois bûche produit par l'ACCC ne sera pas considéré comme un usage concurrent mais comme un fournisseur potentiel de biomasse pour la gazéification.



PHOTOGRAPHIE 6 : STOCKAGE DU BOIS BUCHE SUR LA PLATEFORME DE L'ACCC (AUDOUIN 2015)

Un autre usage concurrent est celui de la demande en terres agricoles. L'*Acacia mearnsii*, auparavant exploité comme source d'énergie pour la distillation des huiles de géranium, a envahi les terres des hauts de l'Ouest depuis la chute de la filière du géranium. Cette prolifération est donc l'une des conséquences de la déprise agricole. Selon le Schéma d'Aménagement Régional (SAR) élaboré en 2011, les activités agricoles pourront s'étendre, sous conditions, dans une partie des zones de continuité écologique, estimées à 12 570 ha sur les 32 760 ha de zones de continuité écologique. Les espaces de continuité

écologique « visent à protéger les fonctions des espaces naturels tout en permettant un certain nombre d'aménagement » et sont définis comme des "espaces de forte valeur [qui] regroupent l'ensemble des espaces naturels remplissant une ou plusieurs des six fonctions essentielles des milieux naturels : biodiversité, paysages patrimoniaux, corridor écologique, lutte contre les pollutions, lutte contre les inondations, espaces de loisirs" (Région Réunion 2011). Or, la présence de l'Acacia n'est pas incompatible avec la définition des espaces de continuité écologiques du SAR, puisque ces peuplements remplissent certaines des fonctions assignées à ces espaces, telles que le maintien de corridors écologiques, ou la lutte contre les inondations. Il est néanmoins à souligner que l'usage de ces espaces de continuité écologique peut entrer en concurrence avec l'extension contrôlée des activités agricoles. En absence de données spatialisées, cet usage concurrent ne pourra pas être pris en compte dans l'évaluation du potentiel mobilisable.

3.2.1.2.1. Potentiel disponible

En considérant les usages concurrents annuels, le potentiel disponible serait donc de **279 260 tMS** sur pied.

3.1.2.4.2. Potentiel mobilisable

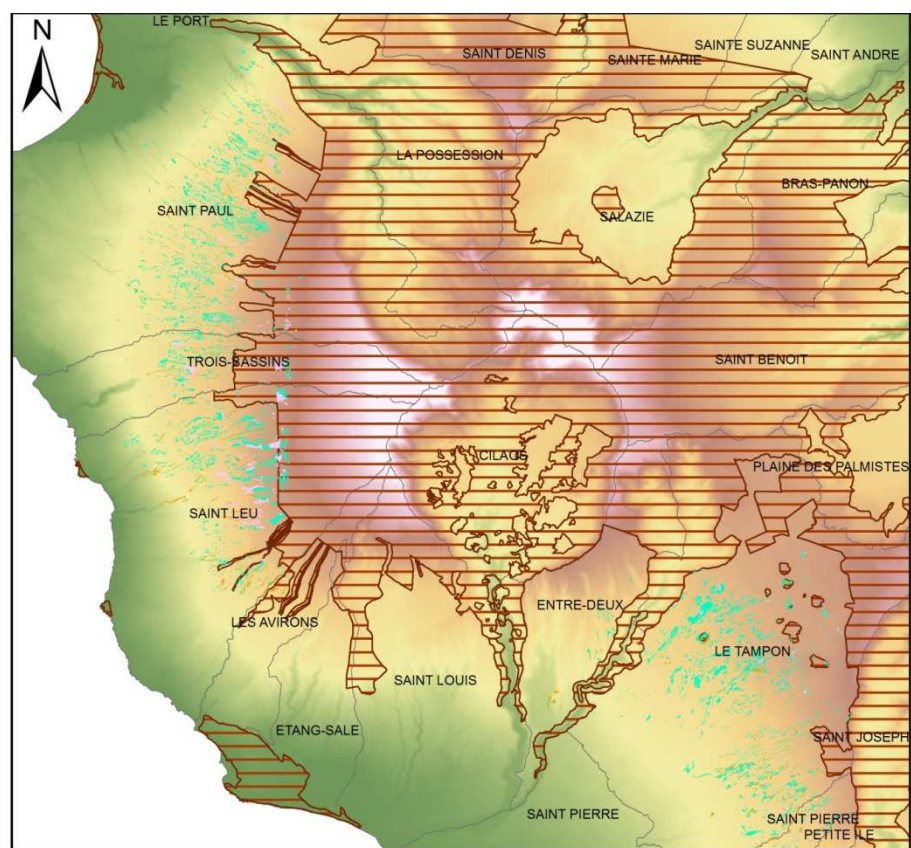
Les acteurs susceptibles d'exploiter l'*Acacia mearnsii* sont l'ONF et des exploitants forestiers privés.

Afin de respecter la réglementation relative au statut d'espèce envahissante de l'*Acacia mearnsii* et dans un objectif d'utilisation durable de cette ressource, l'itinéraire technique envisagé pour sa valorisation énergétique est comparable à un **taillis à courte rotation**¹⁵. Ce mode d'exploitation comporte une coupe rase tous les 10 ans et une régénération naturelle, assurée par la forte croissance de l'espèce et par la forte production de graines, qui constituent aujourd'hui un stock considérable dans les sols des zones envahies (Tassin et al. 2006; Tassin et Balent 2004; Tassin, Rangan, et Kull 2012). Au-delà de 10 années, les peuplements d'Acacia deviennent trop sensibles aux vents et se couchent, ce qui entraîne la prolifération d'autres espèces exotiques envahissantes (telles que le *Lantana camara* L. et *Rubus alceifolius*) (comm. personnelle Rivière 2015). Etant donné qu'il n'est pas nécessaire d'obtenir de la biomasse de grand diamètre, les éclaircies ne sont pas nécessaires, ce qui permet de limiter les coûts de production.

D'après l'ONF et Hauville (2005), les principales contraintes techniques à la mobilisation de la biomasse forestière sont :

- Une pente inférieure à 50% pour permettre l'abattage et le débardage du bois (pente < 15% pour l'abattage mécanique et entre 15 et 50% pour l'abattage manuel (Hauville (2005)),
- La proximité d'un axe de circulation à moins de 150 m.

¹⁵ Voir glossaire



Légende

- Peuplement d'*Acacia mearnsii*, pente < 50%, distance route < 150 m
- Peuplement d'*Acacia mearnsii* pente < 50%
- Peuplement d'*Acacia mearnsii*
- Limites du domaine ONF
- Communes

Altitude en mètres

- Elevée : 3064
- Faible : 0

Sources : Hauville, CIRAD 2007
Réalisation : Audouin 2015

CARTE 2 : POTENTIELS THEORIQUES, DISPONIBLES ET MOBILISABLES D'ACACIA MEARNsii

En considérant une pente inférieure à 50%, une distance maximale de 150 m aux routes et pistes carrossables, la superficie d'*Acacia mearnsii* est de 1 963 ha, dont 96 ha situés dans le domaine de l'ONF. De la même façon que pour l'évaluation du potentiel théorique, nous considérerons les données fournies par l'inventaire ONF 2012. Ce dernier estime que sur les 263 ha d'*Acacia* identifiés, seuls 153 ha sont ou seront accessibles par les dessertes actuelles ou avec celles programmées sous financement du Conseil Régional (projet desserte PAPIF 2012, 30 km ont été réalisés à ce jour).

- Acteurs : peu d'exploitants forestiers et un fort morcellement du parcellaire privé

La Réunion compte très peu d'exploitants forestiers (deux sociétés seulement sont recensées dans l'étude de faisabilité du Pôle d'Excellence Rurale (PER) du projet de gazéification sur le site de Petite France). De fait, l'ONF est le principal exploitant forestier sur l'île. Il existe également des exploitants forestiers informels, généralement non déclarés ni regroupés en associations. Ils commercialisent leur bois de

coupe à l'aide d'annonces dans les journaux locaux. Du fait de ce manque d'information et de formalisation de leurs activités, ces acteurs ne seront pas intégrés dans l'évaluation des acteurs potentiels de cette filière.

Par ailleurs, l'inventaire des peuplements d'Acacia réalisé par Hauville (2005) montre un fort morcellement des peuplements selon le parcellaire, puisque la moyenne des surfaces d'*Acacia mearnsii* par propriétaire cadastral est de 0,4 ha, avec 1 % seulement des parcelles supérieures à 5 ha. Dans ces conditions, l'exploitation de petites surfaces privées (< 1 ha) semble délicate et peu rentable, d'autant plus que les propriétés dans les Hauts de l'Ouest ou du Tampon sont encore fréquemment en indivision ou dont les propriétaires sont mal identifiés. Ces données ne relèvent pas du potentiel mobilisable, mais bien de seuils de rentabilité.

Le potentiel mobilisable correspond donc au dixième des peuplements accessibles pour les surfaces évaluées en propriété privée et au dixième des surfaces accessibles sur le domaine ONF auxquelles sont ensuite retranchées les surfaces nécessaires aux usages concurrents ; soit **196 ha** (22 580 tMS) sur le domaine privé et **10 ha** (1 110 tMS) sur le domaine ONF.

3.1.2.4.3. Synthèse des potentiels de l'*Acacia mearnsii*

TABLEAU 10 : SYNTHÈSE DES POTENTIELS THÉORIQUES, DISPONIBLES ET MOBILISABLES DE L'ACACIA MEARNsii

	<i>Acacia mearnsii</i>					
	Domaine privé		Domaine ONF		TOTAL	
	Superficie (ha)	Quantité (tMS)	Superficie (ha)	Quantité (tMS)	Superficie (ha)	Quantité (tMS)
Potentiel théorique	2 171	257 830	263	30 245	2 434	279 910
Potentiel disponible	2 171	249 655	257	29 595	2 428	279 260
Potentiel mobilisable (/an)	187	21 470	10	1 110	196	22 580

3.1.3. Filière déchets ligneux

3.1.3.1. Broyat de bois palette

3.1.3.1.1. Potentiel théorique

Productivité

D'après les importations de containers sur l'île, il est estimé que 44 000 t de palettes transitent à la Réunion chaque année (100 000 containers/an contenant environ 20 palettes/containers, 1 palette pesant 22 kg). Selon les études (Schéma Directeur Bois Energie 2014, Plan de gestion des déchets non dangereux) et les personnes ressources, il est estimé que 17 400 à 30 000 t de palettes sortent du circuit de transport de marchandises chaque année. Une faible partie est captée par les unités de traitements pour destruction (listées ci-après), l'autre partie est stockée au niveau des industriels, abandonnée voire brûlée de façon illégale.

TABEAU 11 : POTENTIEL THEORIQUE DE BROYAT DE BOIS PALETTE

Société	Localisation	Quantité de palettes traitées (t/an)	Broyat palette produit (t/an)
Métal réunion	Le Port	5 000	3 000
AC2V service	Grand Pourpier (Le Port)	3 000	1 500
S.A.R.L RUN-PAL	Pierrefonds	13 200	1 000
Recyclage de l'Est	Saint André	?	1 000
TOTAL			6 500

Le potentiel théorique s'élève donc à **6 500 t MB/an**.



PHOTOGRAPHIE 7 : STOCKAGE DE PALETTES AVANT TRAITEMENT (AUDOUIN 2015)



PHOTOGRAPHIE 8 : BROYAT DE BOIS PALETTE (AUDOUIN 2015)

Réglementation et droits d'accès

La valorisation énergétique des bois de palette est un objectif départemental clairement établi par le projet de Plan de prévention et de gestion des déchets non dangereux (PPGDND)¹⁶ qui prévoit la valorisation énergétique de 100% des déchets de bois palette à l'horizon 2026 (Conseil Général de la Réunion 2015).

La nouvelle réglementation du 1^{er} janvier 2014, impose que les broyats de bois palettes aient fait l'objet d'une sortie de statut de déchets (SSD) pour les installations de combustion classées sous la rubrique 2910-A. Les palettes utilisées ne doivent pas avoir subi de traitement chimique, ce qui est actuellement le cas des palettes certifiées « Europe » pour lesquelles seul un traitement thermique est autorisé depuis 2004. Les palettes qui étaient auparavant traitées au bromure de méthyl sont aujourd'hui théoriquement arrivées en fin de vie et ne sont donc plus en utilisation.

La sortie du statut de déchets implique que la plateforme de traitement soit une installation classée pour l'environnement, ce qui est le cas de trois des quatre plateformes recensées (Métal Réunion, Recyclage de l'Est et AC2V). Les démarches pour la mise aux normes environnementales de la plateforme de S.A.R.L RUN-PAL étant assez coûteuses, nous considérerons que seules les trois autres pourront effectuer les démarches de sortie de statut de déchet pour commercialiser le broyat de palette à des fins énergétiques.

¹⁶ Ce plan a été approuvé par le Conseil Départemental en octobre 2014. Il est actuellement soumis à enquête publique, avant adoption par l'Assemblée Départementale.

Usages concurrents

Pour la société Métal Réunion, qui traite la plus grande partie des palettes, 90% des broyats de palettes est envoyé en centre d'enfouissement technique de Sainte-Suzanne pour être utilisé comme matériau de recouvrement (ADIR et al. 2008).

Pour les autres plateformes de traitement des palettes, le broyat est utilisé dans le co-compostage, le paillage des productions maraîchères, l'horticulture ou les aménagements paysagers. Certains éleveurs l'utilisent également comme litière en élevage bovin. Le broyat est généralement donné aux utilisateurs agricoles, il est en revanche majoritairement vendu aux aménageurs paysagers ou pépiniéristes, au prix de 20 à 30€/t. La société AC2V réalise un broyage affiné pour le co-compostage qui est ensuite vendu au prix de 30€/m³ à la plate-forme Recyclage de l'Ouest, localisée à proximité. Pour l'ensemble de ces débouchés, la demande reste toutefois assez faible.

Face à cette très faible demande, certaines plateformes de traitement de palette se limitent au broyage des déchets de palettes issues de leur propre atelier de réparation de palette (comme S.A.R.L RUN-PAL et Recyclage de l'Est) et n'acceptent plus de broyer les palettes en fin de vie non récupérables, ce qui explique les faibles quantités broyées, par rapport aux quantités de palettes traitées. Cependant, ces sociétés sont prêtes à augmenter considérablement leur activité de broyage, en cas de débouché assuré et de rentabilité de cette activité. Par comparaison, S.A.R.L RUN-PAL broyait auparavant jusqu' à 5 000 t/an, mais faute de débouchés, la société a réduit ses activités de broyage à 1 000 t/an. S.A.R.L RUN-PAL n'étant pas classés ICPE, nous excluons sa production de broyat du potentiel disponible. En revanche, du fait de l'existence d'un partenariat entre ces deux sociétés, nous considérerons donc que la société Recyclage de l'Est a la capacité de traiter 5 000 t/an si une filière énergétique s'établit, à laquelle nous retranchons 1 000 t, pour assurer les débouchés actuels.

3.1.3.1.2. Potentiel disponible

A partir des quantités actuellement broyées par les sociétés identifiées, de leur statut quant aux normes environnementales, le potentiel disponible est estimé à **5 500 tMB/an**. En ajoutant les capacités de broyage additionnelles en cas de développement de la filière, nous distinguons un potentiel disponible supplémentaire, qui s'élève à **3 000 tMB/an** (à 25% d'humidité environ).

TABLEAU 12 : POTENTIELS THEORIQUES ET DISPONIBLES DU BOIS DE PALETTE

	Potentiel théorique (t/an)	Réglementation et usages concurrents	Potentiel disponible (t/an)	Potentiel disponible supplémentaire (t/an)
Métal réunion	3 000	ICPE, broyats actuellement envoyés en centre d'enfouissement des déchets.	3 000	/
AC2V service	1 500	Usages concurrents = 20% pour ventes co-compostage	1 500	/
S.A.R.L RUN-PAL	1 000	Non ICPE	0	/
Recyclage de l'Est	1 000	Peut augmenter sa capacité de broyage à 5000t/an par partenariat avec Castor Réunion Usages concurrents : 1 000 t/an	1 000	3 000
TOTAL	6 500	/	5 500	3 000

3.1.3.1.3. Potentiel mobilisable

Le broyat de bois palette sera mobilisé à partir des centres de traitements des palettes. Aucune contrainte n'a été identifiée pour la mobilisation des broyats de bois palettes, le potentiel mobilisable est donc égal au potentiel disponible et supplémentaire, soit **8 500 t/an**.

3.1.3.2. Refus ligneux des stations de traitement des déchets verts

3.1.3.2.1. Potentiel théorique

Les stations de traitement des déchets verts concentrent de la biomasse végétale et ligneuse. Certaines stations produisent du compost, d'autres ne procèdent qu'au broyage. Quatre types de biomasse ligneuse peuvent être identifiés à différents niveaux de la chaîne de traitement : la fraction ligneuse issue du broyage des déchets verts, les déchets de palmiers, les refus de compostage et les refus de broyage.

Etant donné l'absence d'équipement et le surcoût pour l'exploitant de la plateforme afin de trier automatiquement la fraction ligneuse des déchets verts broyés, cette option a été éliminée.

Les déchets de palmiers (tiges, feuilles, troncs) sont des biomasses relativement ligneuses et qui présentent un intérêt potentiel pour une valorisation énergétique par gazéification. Cependant, cette biomasse représente une difficulté technique au broyage car les tiges s'enroulent autour des rotors du broyeur ce qui entraîne des pannes à répétition. En ce qui concerne la plateforme du Port, lorsque le chargement de déchets verts contient une grande quantité de déchets de palmiers, la plateforme procède alors à un broyage lent puis réalise un second broyage rapide et plus fin. Les déchets de palmier ainsi broyés ne sont pas comptabilisés comme refus et sont mélangés aux autres déchets végétaux : les volumes de palmiers ne sont donc pas comptabilisés. En absence de mesures spécifiques, cette biomasse n'a donc pas été prise en compte dans le calcul du potentiel.

Le compost nécessite au minimum 9 mois de fermentation puis de maturation. Il est mis en andin, régulièrement arrosé et retourné. En sortie de compost, un criblage est effectué afin d'éliminer la matière ligneuse non dégradée (branchages, fibres de palmiers) ainsi que la matière inorganique non éliminée aux étapes précédentes (minéraux, plastique, aluminium, etc.)). Ces refus de compostage sont très hétérogènes et la matière ligneuse est généralement souillée ; ce qui ne convient pas aux spécificités de la biomasse pour la gazéification. Cette dernière option ne sera donc pas retenue.

Enfin, à la réception des déchets verts, un tri mécanique est effectué par un opérateur à l'aide d'un grappin afin de trier les déchets inorganiques ainsi que les résidus ligneux de grande dimension : souches et branches de grand diamètre. Ces refus ligneux ont donc été identifiés comme des biomasses d'intérêt pour la gazéification et seront comptabilisés dans l'évaluation du potentiel. Compte tenu de l'hétérogénéité des déchets réceptionnés, le taux d'humidité sera considéré comme celui de bois récemment abattu, soit 50%.

Productivité

TABLEAU 13 : POTENTIEL THEORIQUE DES REFUS LIGNEUX DE BOIS EN STATION DE TRAITEMENT DES DECHETS VERTS DE L'OUEST

Station de traitement des déchets verts de l'Ouest	Syndicat mixte, exploitant de la plateforme	Quantité de refus (tMB)
Station de compostage du Port	ILEVA	70 t
Station de broyage de Saint Leu	ILEVA	Non pesé, estimé à 30 t
Station Plaine des Cafres	ILEVA	Non pesé
Station Rivière Saint Etienne	ILEVA	Non pesé, réintégré au processus de broyage

Le potentiel théorique des refus ligneux des stations de traitement de déchets est donc de **100 tMB/an**, soit 50 tMS/an. Il est essentiellement concentré dans les stations de traitement des déchets verts de l'Ouest. Les stations de l'Est (broyage ou compostage des déchets verts), gérées par d'autres syndicats, n'ont pas été retenues pour deux raisons : les volumes de déchets verts traités sont pour l'heure beaucoup plus faibles et la production de compost ou de broyat végétal n'est pas fonctionnelle d'après nos informations (certaines stations sont en attente de régularisation de leurs activités). Cependant, il est probable que ces stations développent leurs activités, en accord avec le Projet de Plan de Prévention et de Gestion des Déchets Non Dangereux (Conseil Général de la Réunion 2015), le potentiel théorique pourrait alors être revu à la hausse.



PHOTOGRAPHIE 9 : REFUS LIGNEUX EN ENTREE DE PLATEFORME, STATION DE TRAITEMENT DES DECHETS VERT DE SAINT LEU, (AUDOUIN 2015)

Réglementation et droits d'accès

Comme pour le broyat de bois palette, le bois issu des stations de traitement des déchets verts doit faire l'objet d'une procédure de sortie de statut de déchet pour être considéré comme une biomasse au sens réglementaire.

Usages concurrents

Ces biomasses ligneuses sont considérées comme des refus de stations et sont difficilement évacuées des plateformes. Sur le plan réglementaire, ces refus de broyage doivent être évacués dans les 15 jours après

réception des déchets verts, ce qui n'est généralement pas pratiqué, faute de débouchés. Certaines stations procèdent alors à un broyage grossier de ces souches et les réintègrent au broyat de déchets verts afin de réduire les volumes de refus. Cette opération représente un coût supplémentaire pour s'assurer de l'élimination de cette matière ligneuse. D'autres stations de traitement qui ne possèdent pas de broyeur forestier évacuent ces souches vers les centres d'enfouissement, ce qui représente une solution coûteuse et à moindre intérêt environnemental.

3.1.3.2.2. Potentiel disponible

Compte tenu de l'encombrement des stations de traitement de déchets et de la nécessité d'évacuer les refus ligneux en entrée de plateforme, le potentiel disponible correspond donc à 100% du potentiel théorique, soit 70tMB pour la plateforme du Port et environ 30 tMB pour la station de Saint Leu.

3.1.3.2.3. Potentiel mobilisable

Les refus ligneux sont triés et stockés séparément sur les plateformes de traitement, ils sont donc facilement collectables (au moyen d'un grappin). Le potentiel mobilisable correspond donc au potentiel disponible.

3.1.4. Résidus agricoles

3.1.4.1. Les pailles de canne à sucre

3.1.4.1.1. Potentiel théorique

Productivité

Les résidus de la récolte de canne à sucre, appelés « paille de canne », correspondent aux feuilles et têtes de canne, appelée « chou ». Leur productivité est estimée entre 11 à 12tMS/ha (Pouzet et al. 2004; Jaglale 2003) à 15 tMS/an (comm. personnelle ErCane 2015), elle varie en fonction de la variété, du type de coupe et du cycle de plantation. D'après l'étude menée par Pouzet et al, la coupe mécanique tronçonnée produit 14tMS/ha alors que la coupe manuelle produit 10 tMS/ha. Le cycle de production influence également la productivité : sur un cycle de 7 années, les premières années produisent généralement davantage de feuilles et donc davantage de pailles à la récolte.

En 2011, la superficie cultivée de canne à sucre est de 24 336 ha de canne (DAAF, 2012), ce qui porte le potentiel théorique à **267 696 tMS/an**. L'humidité des pailles de canne à sucre est estimée à 30% (essais CIRAD Kyulavski 2015).

Réglementation et droits d'accès

A La Réunion, du fait de la proximité des champs de canne à sucre par rapport aux zones habitées et des risques d'incendies dans les zones de conservation écologique, le brûlis des cannes n'est pas autorisé avant la récolte. La coupe en vert est donc obligatoire et conduit à une forte production de pailles.

Il n'y a pas de contrainte réglementaire à l'enlèvement des pailles de canne (pas d'éco-conditionnalités spécifique des aides de la PAC). Cependant, l'une des éco-conditionnalités des aides européennes indique que les parcelles agricoles ne doivent pas rester sans couverture végétale entre le 1er janvier et le 31 mars pour les sols dont la pente est supérieure à 30% (DAAF Réunion 2010), c'est-à-dire peu après la récolte. En cas de repousse de la canne, le sol est couvert et cette éco-conditionnalité n'est pas contraire à l'enlèvement des pailles.

Selon les versants de l'île (Est ou Ouest), les résidus de paille se décomposent plus ou moins rapidement. Dans l'Ouest, où la pluviométrie est plus faible, les résidus de paille non exportés s'accumulent, ils

contraignent le passage des engins agricoles et gênent la repousse de la canne (Chabaliér, Van de Kerchove, et Saint Macary 2006; Pouzet et al. 2004).

Toutefois, l'exportation de la **totalité** des pailles n'est pas encouragée, du fait de son rôle pour le maintien des activités biologiques du sol, pour la lutte contre l'érosion et les adventices et pour la fertilité des sols (Chabaliér, Van de Kerchove, et Saint Macary 2006).

Usages concurrents

Lorsque les parcelles sont mécanisables (faible pente et réalisation d'épierrage), les pailles sont fréquemment exportées pour l'alimentation des élevages bovins. Ces flux de pailles sont principalement destinés aux élevages des Hauts qui ne produisent pas suffisamment de fourrages en saison fraîche (Choisis, Grimaud, et Lassalle 2009; Fusilier et Choisis 2006). La paille est conditionnée en balle rondes de 250 kg ou plus rarement en balles carrées de 500 kg (équipement de la Sicalait) et est parfois traitée avec un mélange d'urée et de mélasse afin d'améliorer la teneur en azote et la digestibilité (Hassoun, Paillat, et Brunschwig 2000). D'après les estimations du secteur cannier, la quantité de pailles exportées pour le secteur de l'élevage s'élève à 5 000 tMS/an. Compte tenu des objectifs d'intensification et d'augmentation du cheptel bovin de l'île, l'objectif à court terme est d'exporter 15 000 tMS/an. Ces exportations ne sont actuellement réalisées que sur les parcelles mécanisées, soit 22% de l'assolement cannier (CER Réunion 2012), soit 5 354 ha.

Sur le plan agronomique, il existe de fortes incertitudes concernant la fraction de paille exportable permettant une gestion durable des sols et de la production de canne à sucre. Des études privées ont été réalisées par eRCane, des essais CIRAD sont également en cours, ainsi qu'une thèse de doctorat. Il est actuellement estimé qu'1/3 des pailles doivent rester au sol, soit 5 tMS/ha selon les estimations eRCane (comm. personnelle eRCane).

3.1.4.1.2. Vers l'évaluation d'un potentiel disponible

En posant l'hypothèse que le secteur de l'élevage atteigne son objectif de consommation de 15 000 tMS/an, et qu'1/3 de la production de paille reste au sol, la quantité de paille restante sur l'ensemble des parcelles (mécanisables et non mécanisables) est de 163 464 tMS/an, soit l'équivalent de la production disponible de 16 385 ha.

Le potentiel disponible doit cependant être considéré avec précaution pour deux raisons. Tout d'abord, en l'état actuel des connaissances scientifiques, il existe peu de données fiables sur la fraction de paille devant rester au sol selon un modèle durable de production agricole. Ensuite, d'après les professionnels de la filière bovine, il semblerait que les planteurs soient peu enclins à vendre leur paille pour des raisons économiques (achetée environ 10 €/t au planteur), ou par crainte de dégrader leur système de culture (passage d'engins agricoles, incertitude sur l'intérêt agronomique de prélever des pailles, etc.). Il en résulte que la filière bovine qui a mis en place un système de collecte des pailles, ne parvient pas à s'approvisionner pour satisfaire les besoins des élevages (800 t de pailles collectées en 2015 pour un objectif de 2000 t au niveau de la Sicalait (comm. personnelle Sicalait 2015)). L'acceptabilité du prélèvement des pailles de canne peut néanmoins évoluer selon l'avancée des recherches agronomiques et selon les évolutions et les collaborations qui s'établissent entre les filières canne et bovine.

3.1.4.1.3. Vers l'évaluation d'un potentiel mobilisable

La mécanisation des parcelles demeure la contrainte technique principale afin de pouvoir conditionner les pailles et les transporter. Seules les parcelles mécanisables seront donc considérées comme accessibles. A partir des hypothèses d'usages concurrents du potentiel disponible (besoins du secteur de l'élevage et

retour d'une partie de la matière organique au sol), le potentiel mobilisable s'élève donc à 38 539 tMS/an, soit l'équivalent de la paille exportée (au 2/3) sur 3 854 ha.

3.1.5. Culture dédiée à l'énergie

Il n'y actuellement aucune culture dédiée exclusivement à l'énergie produite sur l'île de la Réunion. Cependant, au regard du potentiel que représentent ces cultures à fort rendement agricole et énergétique, il nous a semblé important de pouvoir analyser les potentiels théoriques, disponibles et mobilisables de telles cultures dans la limites des données disponibles.

Pour ce faire, certaines hypothèses quant à la localisation de ces cultures devront être posées *a priori*, en tenant compte du contexte particulier de pression foncière sur les terres agricoles de l'île. Ces résultats sont partiels et donnent un premier aperçu des potentiels théoriques et disponibles mais ne prennent pas en compte l'ensemble des hypothèses nécessaires à leur évaluation. Ces hypothèses devront faire l'objet d'une concertation ultérieure avec l'ensemble des acteurs concernés de l'île, tant au niveau agricole qu'au niveau rural et énergétique.

3.1.5.1. Canne fibre

La canne « fibre » correspond à des variétés particulières de canne à sucre, sélectionnées de façon à produire davantage de fibre et moins de sucre. Certaines variétés sont issues du croisement avec l'espèce *Saccharum spontaneum*, une canne à sucre rustique à haute productivité en fibre (le tallage est plus important). D'autres variétés sont appelées « mixtes » et sont issues de sélections variétales de canne à sucre à fort tallage (SYPECAR 2014; Tricard 2014).

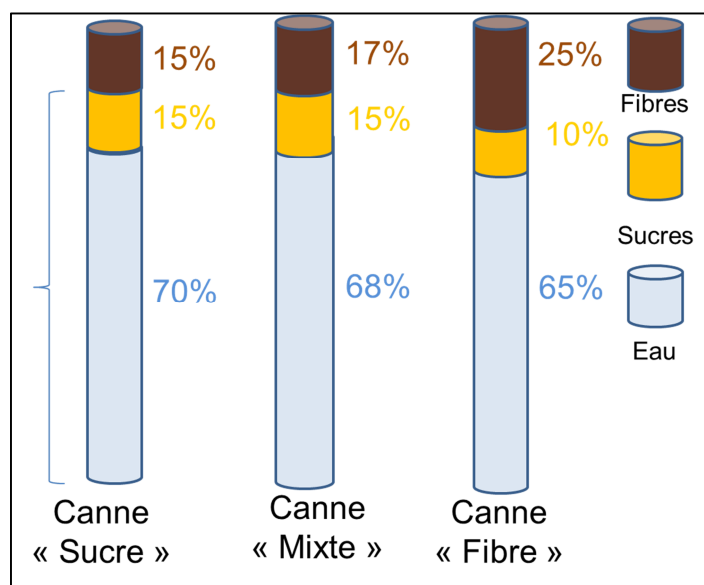


FIGURE 6 : COMPARAISON DE LA COMPOSITION DES CANNES A SUCRE, MIXTES ET DES CANNES FIBRES (SOURCE : ALEXANDER ET AL., 1984 ; CHOPART EL AL., 2012 ; DE BOER, 2007 ; ERCANE; POUZET, 2011 ; SABATIER, 2012, IN TRICARD, SYPECAR 2015).

Les hypothèses sur les caractéristiques agronomiques et les itinéraires techniques envisagés sont basées sur les résultats du projet SYPECAR (SYstèmes de Production Energétique à base de Canne à la Réunion), coordonné par le CIRAD, sous les financements de l'Europe et du CIRAD et avec comme partenaires ER-cane, l'INRA et la Région Réunion (SYPECAR 2014).

3.1.5.1.1. Potentiel théorique

Productivité

Des essais variétaux ont été réalisés par le projet SYPECAR sur deux sites à altitude et pluviométrie distinctes : Station de La Mare, commune de Sainte Marie, 10 m d'altitude et 1500 mm de pluviométrie annuelle, Station de Bérive, commune du Tampon, 600 m d'altitude et 1300 mm de pluviométrie. Nous retiendrons des variétés testées à Bérive, de moyenne altitude et de plus faible pluviométrie, de façon à répondre aux hypothèses de localisation qui seront présentées ci-après.

Le rendement moyen retenu est de **150 t MB/ha** avec **68% d'humidité** sur la première année de production des cannes et pour un cycle de production de 12 mois. Les feuilles et la tête de la canne ne sont pas comptabilisées dans les calculs, or il est estimé que la tête de canne représente 10 % de la MS totale et les feuilles (paille) 20 % de la MS sur l'ensemble de la plante, racines et souche comprises (cf tableau suivant).

TABLEAU 14 : REPARTITION DE LA MATIERE SECHE DE LA CANNE FIBRE (SYPECAR 2015)

Partie de la plante	Part de la matière sèche (%)
Canne	50
Tête	10
Feuilles	20
Souche	5
Racines	15

Le potentiel théorique correspond à la production issue de l'ensemble des terres agricoles et des terres supplémentaires identifiées par le Schéma d'Aménagement Régional (SAR 2011) ; soit 68 000 ha, soit 10 200 000 tMB/an.

Réglementation et droits d'accès

L'exploitation de nouvelles terres pour la mise en culture de la canne fibre nécessite la prise en compte de l'ensemble des documents qui encadrent l'aménagement rural. Ainsi, certains espaces devront être exclus du potentiel disponibles car aucune (nouvelle) activité agricole n'y est autorisée (ZNIEFF, Cœur de Parc National, Espaces boisés classés, espaces naturels sensibles, zones de captage d'eau, etc.).

Le SAR élaboré en 2011, n'intègre pas la canne fibre de façon spécifique dans la planification de l'usage des sols. Ce schéma donne les orientations générales pour l'aménagement du territoire et la protection de l'environnement, il sert d'outil au niveau régional et communal pour la planification du développement territorial. En tant que document de rang supérieur, le SAR s'impose aux SCOT (schémas de cohérence territoriale), aux POS (Plans d'occupation des sols), et aux PLU (Plans locaux d'urbanisme) qui doivent donc être compatibles avec ses prescriptions. Le SAR préconise la préservation des 55 430 ha d'espaces agricoles et délimite 12 570 ha d'espace de continuité écologique sur lesquelles les activités agricoles seront acceptées (telles que la mise en valeur des friches agricoles).

La nouvelle loi de transition énergétique, qui sera soumise à l'Assemblée nationale en deuxième lecture le 19 mai puis au Sénat dans le courant du mois de juin, devra également être prise en compte, particulièrement vis-à-vis des restrictions visant les cultures dédiées à l'énergie.

Usages concurrents

Pour les biomasses déjà produites sur l'île, ce paragraphe traite des usages concurrents de la biomasse. Or, dans le cas de cultures non produites sur l'île, la méthode cible les usages concurrents des terres sur lesquelles elles seront produites.

Une première hypothèse peut être posée concernant les espaces de continuité écologiques du SAR pouvant accueillir des activités agricoles sous conditions (12 570 ha)(Région Réunion 2011, 116). En considérant que la totalité soit convertie en espace agricole et en supposant une répartition équitable de ces espaces entre une vocation pour l'élevage, pour la production de canne à sucre et pour la production de canne fibre ; les espaces potentiellement disponibles pour la canne fibre s'élèveraient à 4 190 ha.

3.1.5.1.2. Vers l'évaluation d'un potentiel disponible

Selon cette hypothèse d'occupation d'1/3 des terres supplémentaires pour la canne fibre, le potentiel disponible s'élève à 628 500 tMB/an. Il convient de prendre ces résultats avec précautions, une évaluation plus fine des espaces disponibles est nécessaire.

3.1.5.1.3. Vers l'évaluation d'un potentiel mobilisable

Le potentiel mobilisable devra tenir compte des itinéraires techniques et des acteurs ciblés pour la production de canne fibre. Les études sur le séchage de la canne fibre, réalisées par le projet SYPECAR montrent, entre autres, que l'étape de séchage est importante pour la valorisation énergétique car la canne fibre contient 70% d'humidité à la coupe. Un séchage au champ permet alors de réduire fortement et rapidement l'humidité, particulièrement lorsque la canne est broyée. Cependant, la collecte de la canne broyée nécessite une opération au champ coûteuse et complexe afin de la transporter vers la zone de transformation énergétique. Ces itinéraires devront donc être consolidés à partir d'expérimentations supplémentaires et en tenant compte des acteurs et des types de filières envisagées (séchage au champ versus séchage en plateforme, production sur terres mécanisables ou non, complément d'activité pour les canniers ?).

3.1.5.2. Plantations d'eucalyptus

3.1.5.2.1. Potentiel théorique

Productivité

D'après une campagne de criblage de variétés d'eucalyptus pour un débouché en bois-énergie et présentant peu de risques d'envahissement, réalisée par le CIRAD entre 1999 et 2006, il est possible d'estimer la productivité des plantations d'eucalyptus à 20 m³/ha/an en moyenne (*Eucalyptus maculata*, *Eucalyptus grandis*)(Sarraihi et Rivière 2006). Ces données doivent cependant être considérées avec précaution car le dispositif expérimental n'est pas conçu pour évaluer une productivité ligneuse mais plutôt pour sélectionner des espèces (absence de répétition dans les essais, calcul du volume réel de chaque arbre puis extrapolation à la parcelle, etc.).

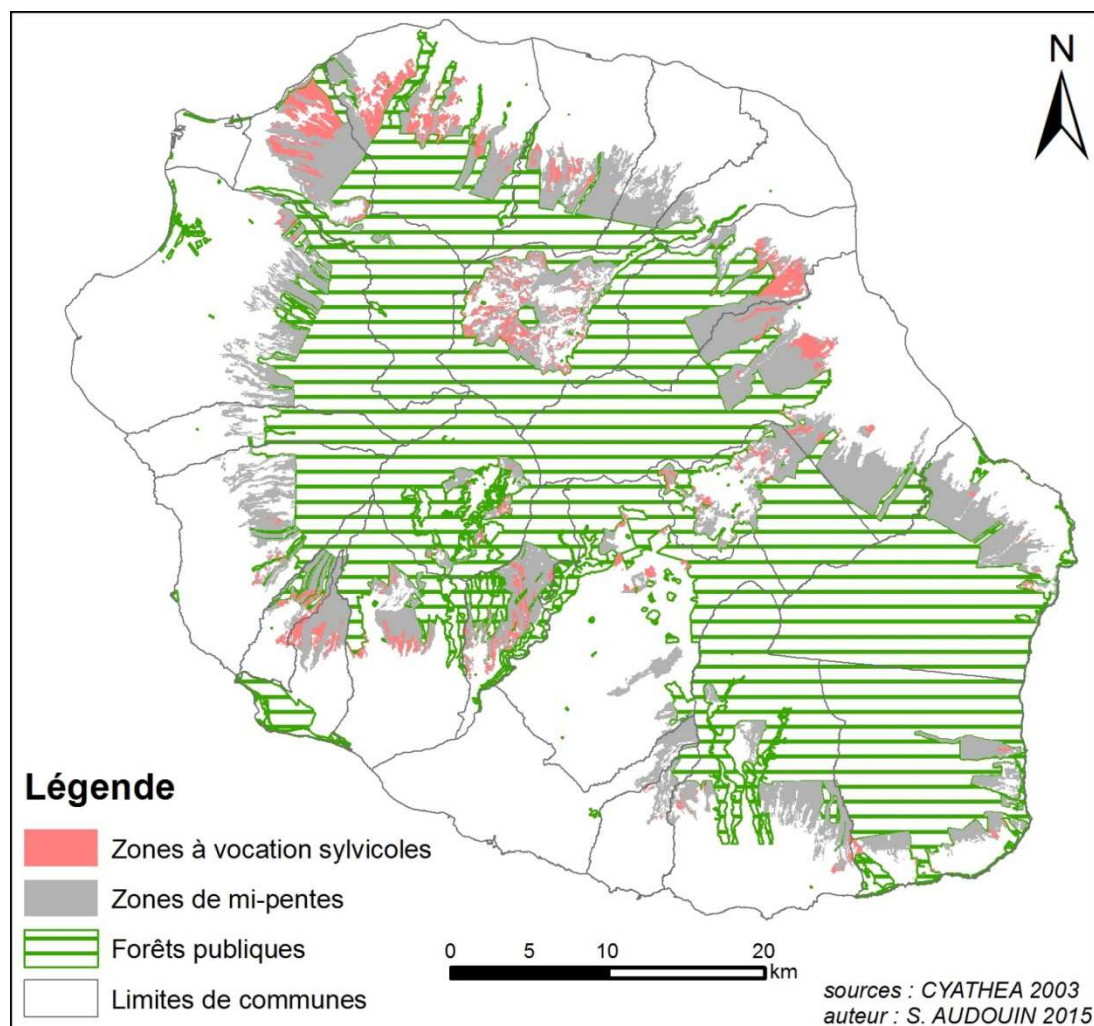
Réglementation et droits d'accès

De la même façon que pour l'évaluation d'un potentiel disponible pour les cultures de canne fibre, les plantations d'eucalyptus devront être situées dans des zones conformes à la réglementation en vigueur et en respectant les schémas d'aménagements locaux (SAR 2011, PLU, POS).

Une étude réalisée par CYATHEA évalue les surfaces à vocation sylvicoles dans les mi-pentes, en dehors des zones agricoles et des zones de conservation écologique (ZNIEFF, Parc National, EBC, ENS, pentes > 40%).

Usages concurrents

L'étude des vocations sylvicoles des mi-pentes réalisée par CYATHEA intègre une partie des usages concurrents puisque seules les terres des mi-pentes sont incluses. Les terres des bas déjà fortement occupées par les activités agricoles et les zones d'habitat sont ainsi exclues de l'analyse. De plus, CYATHEA a exclu les terres à fort potentiel agricoles dans les mi-pentes (d'après la cartographie de Raunet 1991). La superficie des terres des mi-pentes à vocation sylvicole s'élève à 5 900 ha (CYATHEA 2003)



CARTE 3 : LOCALISATION DES TERRES A VOCATION SYLVICOLE (D'APRES ETUDE CYATHEA 2003)

3.1.5.2.2. Vers l'évaluation d'un potentiel disponible

En tenant compte de la productivité des plantations, des restrictions réglementaires sur les terres des mi-pentes, et des usages concurrents identifiés par CYATHEA, le potentiel disponible serait de 82 600 tMB/an.

3.1.5.2.3. Vers l'évaluation d'un potentiel mobilisable

Comme pour le cas de la canne fibre, le potentiel mobilisable devra tenir à la fois compte des acteurs et de leurs contraintes techniques ; des critères tels que la pente maximale et la distance aux dessertes forestières ou aux routes seront devront être retenus.

3.1.6. Synthèse et conclusions partielles

TABEAU 15 : SYNTHÈSE DES POTENTIELS DES BIOMASSES ET PART DE L'ÉNERGIE THERMIQUE MOBILISABLE POUR LE GAZEIFIEUR DU CFPPA (1880H/AN)

	Bois de taille de manguiers lycée St Paul		Elagage haies Lycée St Paul		Bois de taille de manguiers		Produits connexes exploitation <i>Cryptomeria</i>		<i>Acacia mearnsii</i>		Pailles de canne à sucre		Fraction ligneuse déchets verts (stations de l'Ouest)		Broyat Bois Palette		Canne fibre		Eucalyptus	
Potentiel théorique	7,4 t MB/an		15 tMB/an		739 tMB/an		4 106 tMB/an		559 820 tMB		382 422 tMB/an		3 948 tMB/an		6 500 tMB/an		1 885 500 tMB/an		?	
Potentiel disponible	7,4 tMB/an		15 tMB/an		684 tMB/an		3 746 tMB/an		558 520 tMB		272 440 tMB/an		100 tMB/an		8 500 tMB/an		628 500 tMB/an (à consolider)		82 600 tMB/an (à consolider)	
Potentiel mobilisable	7,4 tMB/an		15 tMB/an		684 tMB/an		3 746 tMB/an		11 290 tMB/an		64 261 tMB/an		100 tMB/an		8 500 tMB/an		à construire		à construire	
	3,7 tMS/an		7,5 tMS/an		342 tMS/an		1 873 tMS/an		5 645 tMS/an		38 539 tMS/an		50 tMS/an		6 560 tMS/an		à construire		à construire	
PCI (kW/t) (humidité et source)	4956 H O%, (Phyllis, 2012)		5117 H 0% (Bouvier 2008, in IFN, FCBA, et SOLAGRO 2009)		4956 H O%, (Phyllis, 2012)		5 060 H 0% (FCBA 2008 in IFN, FCBA, et SOLAGRO 2009)		5060 H 0% (FCBA 2008 in IFN, FCBA, et SOLAGRO 2009)		5112 H 0% (Ripoli et al. 2000)		5060 H 0% (FCBA 2008 in IFN, FCBA, et SOLAGRO 2009)		3800 (H25%) Tests ADEME ⁽¹⁷⁾ Chanrion 2008) Metal Réunion		4509 H 0% (Sypecar)		5236 H 0% (Phyllis, 2012)	
Energie thermique PCI mobilisable (MWh)	18		38		1 695		9 477		28 563		173 772		253		39 956		?		?	
Part de l'énergie thermique PCI	1880 h/an	6000 h/an	1880 h/an	6000 h/an	1880 h/an	6000 h/an	1880 h/an	6000 h/an	1880 h/an	6000 h/an	1880 h/an	6000 h/an	1880 h/an	6000 h/an	1880 h/an	6000 h/an				

nécessaire pour le gazéifieur CFPPA (%)	8	3	17	5	751	235	4 201	1 316	12 661	3 967	77 027	24 135	112	35	17 711	5 550	?	?
--	---	---	----	---	-----	-----	-------	-------	--------	-------	--------	--------	-----	----	--------	-------	---	---

Le tableau ci-dessus présente la synthèse des trois niveaux de potentiels (théorique, disponible et mobilisable) des différentes biomasses analysées. Ces potentiels s'appliquent à l'échelle régionale pour l'ensemble des biomasses, excepté pour le bois de taille des manguiers du lycée St Paul et le bois issu de l'élagage haies du lycée St Paul. Ces potentiels ont été calculés en vue de l'approvisionnement spécifique de la plateforme du CFPPA. Les quantités d'énergie mobilisables sont ensuite converties en énergie pci (pouvoir calorifique inférieur), c'est-à-dire l'énergie thermique en entrée de gazéifieur. Elles sont ensuite comparées aux besoins en énergie pour le fonctionnement du gazéifieur envisagé pour la plateforme du CFPPA. Les besoins du gazéifieur ont été calculés pour deux durée de fonctionnement : 1880 h/an (soit 47 semaines/an, 5j/semaine, 8h/j) et 6 000 h/an avec un rendement énergétique de 20% et un taux de charge de 80%. L'hypothèse de fonctionnement de 1880h/an est la plus probable compte tenu des contraintes de fonctionnement et de gestion du lycée et des objectifs assignés à la plateforme (voir partie suivante). L'hypothèse de fonctionnement de 6000h/an correspond aux durées communes de fonctionnement des unités de gazéification utilisées comme outils de production. La quantité d'énergie calorifique nécessaire fournie par la biomasse entrante est donc respectivement de 226 et 720 MWhpci/an.

Les biomasses produites par le lycée de Saint Paul (bois de taille de manguiers et bois d'élagage des haies) présentent les potentiels les plus faibles. La quantité d'énergie produite par ces biomasses, y compris lorsqu'elles sont combinées, ne permette pas de couvrir la totalité des besoins du CFPPA quelle que soit la durée de fonctionnement du gazéifieur.

Le bois issu de la taille des manguiers de l'île pourrait fournir suffisamment d'énergie pour le fonctionnement de la plateforme. Les produits connexes de l'exploitation de cryptomeria, ainsi que le bois d'*Acacia mearnsii* présentent des potentiels très élevés ; avec plus de 42 fois et 126 fois la quantité d'énergie nécessaire au gazéifieur du CFPPA pour un fonctionnement de 1880h/an.

Les pailles de canne à sucre, seuls résidus agricoles identifiés pour une valorisation énergétique, présentent un des potentiels les plus élevés, avec un potentiel mobilisable 100 fois supérieur aux besoins du gazéifieur (1880h/an). Toutefois, le manque de données quant aux usages concurrents et particulièrement à la fraction de paille nécessaire à la gestion durable de la parcelle, invite à prendre ces résultats avec prudence.

Au niveau de la filière déchet, la fraction ligneuse des déchets verts des stations du Port et de Saint Leu peuvent satisfaire à peine plus des besoins du gazéifieur, avec 112% pour un fonctionnement 1880h/an. En revanche pour une durée de fonctionnement de 6 000 h/an, cette biomasse ne permet pas de subvenir à la totalité des besoins de la plateforme. Un apport constitué d'un mix de biomasse pourrait alors être envisagé. A l'inverse, le broyat de bois palette présente un potentiel mobilisable élevé et pourrait fournir respectivement 177 fois et 5 fois les besoins du gazéifieur pour des durées de fonctionnement de 1800 et 6000h/an.

Pour les cultures dédiées, seuls les potentiels théoriques et disponibles ont été déterminés pour la canne fibre et uniquement le potentiel disponible pour l'eucalyptus. Les premières évaluations montrent de forts potentiels, particulièrement pour la canne fibre. Ces évaluations nécessitent toutefois davantage d'analyse afin d'enrichir les hypothèses formulées quant à la disponibilité des terres pour de telles cultures, ce qui pourrait réduire fortement les niveaux de potentiel obtenus. A cela, devront s'ajouter les contraintes de mobilisation de la biomasse, selon les acteurs et au niveau technique.

3.2. Objectifs et scénarios de filière

3.2.1. Objectifs de la plateforme du CFPPA

Après discussions entre les principaux partenaires du projet, l'objectif principal de la plateforme sera d'être un **outil d'expérimentation** permettant 1/ d'analyser les possibilités d'approvisionnement et de fonctionnement de divers biomasses, 2/ d'optimiser pour chacune des biomasses testées le fonctionnement et l'efficacité de la plateforme et 3/ d'évaluer l'impact des différentes filières d'approvisionnement (sur le plan économique et environnemental). L'objectif **pédagogique** vient en second plan et s'adaptera aux campagnes d'expérimentations en cours. L'objectif de **démonstration** apparaît en troisième plan. L'objectif de **production rentable d'électricité** est écarté à court et moyen terme.

3.2.1.1. Utilisation de la plateforme comme outil d'expérimentation

Mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement de la plateforme comme outil d'expérimentation dépendra principalement du type de partenariat et de financement mis en place pour la réalisation de campagnes d'expérimentations. Ces campagnes se décomposent en cinq sous-objectifs successifs :

- 3.3. La préparation de la biomasse : le broyage et le séchage de différentes biomasses afin d'obtenir une granulométrie et une humidité conformes aux spécificités du gazéifieur.
- 3.4. La maîtrise du procédé afin d'obtenir un fonctionnement stable : les étapes de démarrage, mise en chauffe du gazéifieur et d'atteinte d'un régime stable seront testées et mesurées au moyen de différents indicateurs (stabilisation des températures, des débits entrants, de la production électrique, etc.).
- 3.5. L'évaluation de la performance : des bilans énergétiques et massiques seront réalisés.
- 3.6. La caractérisation fine des produits et émissions : échantillonnage des gaz et des résidus solides (cendres carbonées), quantification des goudrons.
- 3.7. Le suivi de la performance sur le moyen terme : campagnes d'essais de quelques jours à 1 semaine de production en continue.

Ces cinq étapes seront reproduites pour chaque type de biomasses ou de mix de biomasses testés.

Contraintes et besoins de fonctionnement

Un programme prévisionnel d'expérimentation sera fourni en septembre 2015, contenant une estimation des charges, du temps de travail et un échéancier.

3.2.1.2. Utilisation de la plateforme comme outil pédagogique

Mode de fonctionnement

L'intérêt de l'utilisation de la plateforme en tant qu'outil pédagogique est de servir de support de formation sur la thématique transversale des filières de biomasse-énergie. Ainsi, il sera possible d'illustrer l'intégration des activités agricoles ou forestières avec leur valorisation énergétique. Les différentes étapes qui composent ces filières pourront être mises en pratique au niveau du lycée, depuis la production agricole ou l'exploitation forestière, l'extraction de la biomasse à débouché énergétique (résidus agricole, produits connexes de la foresterie ou culture dédiée), les activités de pré-traitement de la biomasse (broyage, séchage) jusqu'à la valorisation énergétique par gazéification. Il sera également possible d'intégrer la filière de traitement des déchets avec les déchets verts ligneux ou le bois palette.

Enfin, l'ensemble de ces filières est propice à la réalisation de modules d'évaluations technique, économique et environnementale dans une approche interdisciplinaire.

Contraintes et besoins de fonctionnement

D'après les responsables du lycée, les besoins en termes pédagogiques ne doivent pas représenter une contrainte au fonctionnement de la plateforme. Le contenu pédagogique s'adapte à des activités existantes et maîtrisées sur le plan technique. De plus, le format des modules et des travaux pratiques est de courte durée, ce qui correspond à quelques dizaines d'heures par modules. D'un point de vue logistique et afin de réduire les coûts de fonctionnement de l'unité de gazéification, il serait opportun de coordonner les futures campagnes d'expérimentation avec les activités pédagogiques.

Par ailleurs, afin de réaliser cet objectif pédagogique il est nécessaire que la plateforme soit homologuée pour accueillir un public d'apprenants.

3.2.1.3. Utilisation de la plateforme comme outil de démonstration

Mode de fonctionnement

La plateforme pourra être valorisée comme outil de démonstration vis-à-vis des porteurs de projets, partenaires de la Région, du lycée, du CIRAD ou autres institutions potentielles. Cette étape ne pourra avoir lieu qu'après réalisation de différentes campagnes d'expérimentation afin de s'assurer de la maîtrise de la technologie et de fournir des références techniques, économiques et environnementales consolidées.

Contraintes et besoins de fonctionnement

Les besoins en fonctionnement reposent sur une utilisation ponctuelle de la plateforme, à l'occasion de visites de porteurs de projets ou de partenaires. Des campagnes de fonctionnement en continu sur quelques jours (2 à 3 jours) sont ainsi adaptées à cet objectif. Comme pour l'objectif pédagogique, il serait opportun de coupler ce fonctionnement avec celui de l'expérimentation, dans une seconde phase, afin de réduire les coûts de fonctionnement.

3.2.1.4. Utilisation de la plateforme comme outil de production

Mode de fonctionnement

A ce stade des réflexions, il est important de préciser que l'objectif de production d'électricité permettant de dégager un bénéfice économique ne pourra pas être atteint à court et moyen termes. En effet, à partir des données techniques du cahier des charges de la plateforme et des premières simulations, le coût de production s'élève à 0,52 €/kWh sans intégrer le coût d'achat de la biomasse¹⁸. Le prix d'achat de l'électricité est de 0,0434 €/kWh pour les installations de combustion. Ce coût s'explique principalement par la petite capacité de l'unité (30 kWé) et son faible temps de fonctionnement (estimé à 1 880 h/an, soit 8h/j, 5j/semaine et 47 semaines/an). Il est à noter que certains équipements permettent de fonctionner en continu avec très peu de besoin de main d'œuvre (2h/j pour les équipements SPANNER par exemple), ce qui permet de réduire fortement le coût de production, sans pour autant atteindre le prix d'achat actuel de l'électricité.

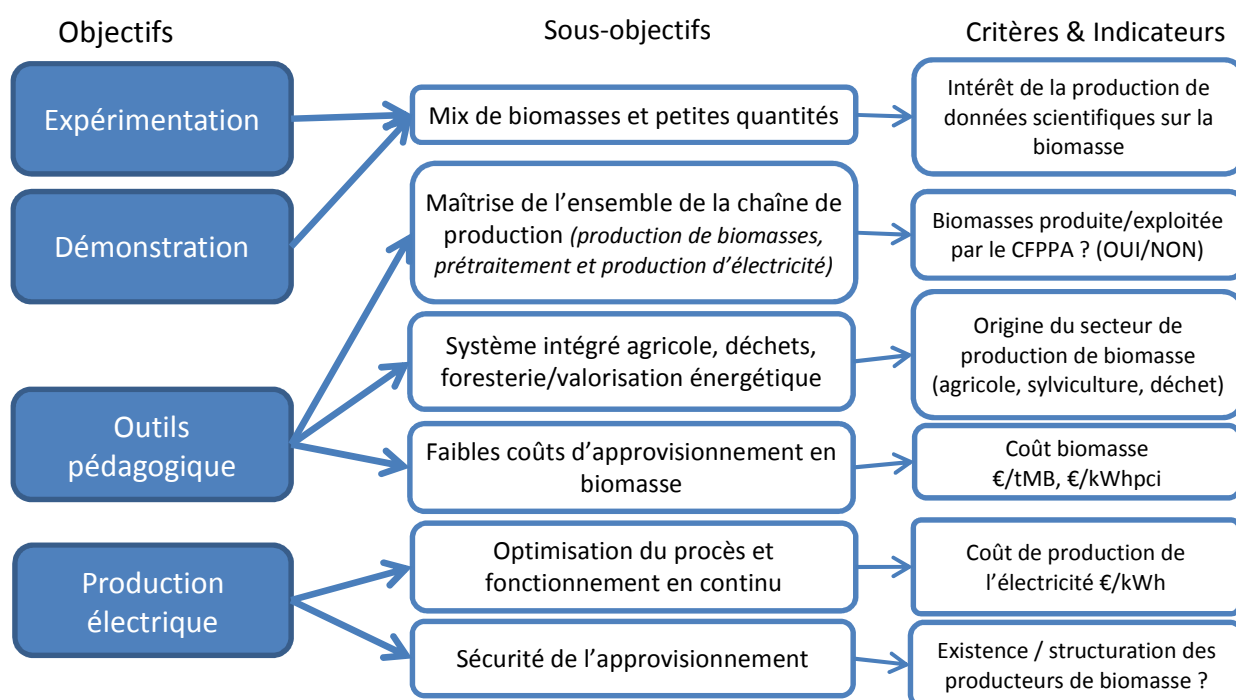
¹⁸ Charges fixes : Investissement 440000€ subventionné à 70%, amortissement linéaire sur 10 ans ; charges variables : maintenance = 5% de l'investissement, charges de personnel = 6,5h/semaine, taux horaire SMIC patronale.

Contraintes et besoins de fonctionnement

Les unités de gazéification utilisées dans un objectif de production fonctionnent généralement en continu, soit 7 000 h/an. Dans le cas de la plateforme du CFPPA de Piton saint Leu, la durée de son fonctionnement dépend principalement de la charge de personnel qu'il est possible de financer.

3.2.2. Les critères de sélection des scénarios selon les objectifs des filières de gazéification du CFPPA

Les quatre objectifs pré-identifiés pour la plateforme de gazéification du CFPPA sont déclinés en sous-objectifs, puis en critères et indicateurs spécifiques. Par exemple, l'objectif pédagogique de la plateforme se décline en sous-objectifs qui concernent la maîtrise de toutes les étapes de la chaîne de production. Le critère correspondant questionne la localisation de la production de la biomasse par le CFPPA ou en dehors du CFPPA.



3.2.3. Exemples de scénarios pour la plateforme du CFPPA

A partir des biomasses identifiées en partie 3.1 et des combinaisons probables et réalistes d'acteurs et de modes d'approvisionnement, neuf scénarios distincts sont proposés pour la plateforme du CFPPA

TABLEAU 16 : EXEMPLES DE SCENARIOS POUR LA PLATEFORME CFPPA

Nom Scénarios	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Biomasse	Produits connexes cryptomeria	<i>Acacia mearnsii</i>	Bois palettes	Bois déchets verts	Canne fibre	Bois élagage + taille manguiers Lycée St Paul + bois palette	Paille canne	Bois éclaircie	Bois eucalyptus
Acteurs producteurs de la biomasse	ONF	ACCC	AC2V ou Métal Réunion	Stations traitement déchets verts St Leu et St Paul	CFPPA	Saint Paul + Ac2v ou Métal Réunion	CFPPA	CFPPA	CFPPA
Type d'accord pour l'acquisition de la biomasse	Contrat d'appro.	Contrat d'appro.	Contrat d'appro.	Contrat d'appro.	Production agri. du lycée, vente au projet ou intégration coûts par le lycée	Prestation service (bois élagage et de taille) + contrat d'appro pour les palettes	Intégration coûts par le lycée ou vente au projet	Prestation service élagage, et/ou TD formation élèves	Prestation service élagage, et/ou TD formation élèves
Acteurs producteur d'énergie	CFPPA	CFPPA	CFPPA	CFPPA	CFPPA	CFPPA	CFPPA	CFPPA	CFPPA

3.2.4. Les scénarios sélectionnés pour le CFPPA

D'après la méthodologie développée, les scénarios sont sélectionnés selon la hiérarchie des objectifs, c'est-à-dire leur intérêt pour l'objectif d'expérimentation puis pour l'objectif pédagogique. Or, il apparaît que l'ensemble des scénarios présente un intérêt potentiel pour répondre à l'objectif d'expérimentation. En effet, l'ensemble des biomasses identifiées nécessitent d'approfondir les connaissances notamment quant à leur caractérisation (pouvoir calorifique, taux de cendre) et l'optimisation de leur préparation (broyage, séchage, densification). C'est donc l'objectif pédagogique qui sera le plus déterminant dans la sélection des scénarios. Les quatre scénarios retenus sont F2, F3, F7 car ils présentent des réponses différentes aux trois critères de cet objectif (tableau ci-dessous). Chaque scénario concerne un secteur producteur de biomasse différent : agriculture, foresterie et valorisation des déchets. Deux scénarios concernent des biomasses produites en dehors du CFPPA (*Acacia mearnsii*, palette), et deux scénarios de la biomasse produite par le CFPPA (pailles de canne et canne fibre). Le coût d'acquisition de la biomasse varie, le coût le plus faible est celui du bois palette et le plus élevé celui de l'*Acacia mearnsii*.

TABLEAU 17 : SCENARIOS SELECTIONNES POUR LA PLATEFORME DU CFPPA

Scénario : biomasse / acteur producteur de la biomasse Critères objectif pédagogique	F2 : Acacia / ACCC	F3 : Palette / AC2V ou Métal Réunion	F7 : Paille canne / CFPPA	F5 : Canne fibre / CFPPA
Secteur producteur de biomasse	Foresterie	Déchet	Agriculture	Agriculture
Biomasse produite par le lycée	NON	NON	OUI	OUI
Coût d'acquisition de la biomasse (€/tMB)	95	26	60	50

3.2.5. Panorama de objectifs des filières gazéification à l'échelle régionale

A l'échelle régionale, les filières biomasse-énergie répondent à de multiples objectifs, car elles concernent différents secteurs : agriculture, énergie, forêt, emploi, le milieu rural et industriel, etc. Cinq grands objectifs peuvent être identifiés pour ces filières à la Réunion :

- **l'augmentation de la part d'énergie renouvelable** non intermittente dans le mix électrique. Tout d'abord afin de contribuer à l'objectif d'autonomie électrique fixé par le SRCAE (Schéma Régional Climat Air Energie) d'ici 2030. Ensuite, les énergies non intermittentes présentent moins de risques et de contraintes techniques vis-à-vis de leur disponibilité pour le fournisseur d'électricité du réseau (EDF) que les énergies renouvelables intermittentes (éolien, photovoltaïque).
- Permettre **l'autonomie énergétique** de certains territoires. Dans le cadre de la transition énergétique pour la croissance verte, la maîtrise de la production et de la consommation d'énergie deviennent des thématiques prioritaires. Ainsi, le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie a développé un dispositif incitatif pour favoriser l'émergence de **territoires à énergie positive pour la croissance verte** (Tepos). Ces territoires doivent proposer des projets visant à *« atteindre l'équilibre entre la consommation et la production d'énergie à l'échelle locale en réduisant autant que possible les besoins énergétiques et dans le respect des équilibres des systèmes énergétiques nationaux »*¹⁹. Par ailleurs, certains territoires présentent des contraintes techniques d'acheminement de l'électricité lorsqu'ils sont localisés en bout de ligne haute tension et non secourues par le réseau en cas de rupture d'approvisionnement. Il est alors possible de combiner ces deux éléments et d'identifier des territoires qui présentent à la fois une forte disponibilité de biomasse et des contraintes d'acheminement de l'électricité par le réseau. L'intérêt serait de fournir une énergie produite et consommée localement.
- Contribuer à **l'aménagement des territoires**. Les filières biomasse-énergie peuvent être pourvoyeuses d'emploi, que ce soit en milieu rural ou en milieu urbain, selon les caractéristiques et l'étendue de la filière. Dans un contexte régional où le taux de chômage s'élève à 30 % et où 42 % de la population vit sous le seuil de pauvreté, l'emploi apparaît comme un élément clé de l'aménagement des territoires. Ces emplois sont diversifiés et concernent tous les maillons de la filière : production, transport, prétraitement, valorisation énergétique.
- Participer **au traitement des déchets** par la valorisation énergétique. Compte tenu de la difficulté de gestion des déchets dans un territoire aux fortes contraintes foncières et avec un accroissement de

¹⁹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Un-territoire-a-energie-positive.html>

la population de 10 000 habitants/an (population estimée à 1 million d'habitant en 2030, INSEE), la valorisation des déchets est un enjeu environnemental primordial. Il existe différentes solutions techniques pour la valorisation des déchets (valorisation agronomique par compostage, valorisation énergétique). La gazéification peut ainsi contribuer à éliminer et valoriser les déchets de type ligneux et secs.

- Favoriser l'émergence d'une **filière bois-énergie**. L'île de la Réunion présente un massif forestier unique par sa dimension et sa biodiversité : le Cœur de Parc National. En dehors des zones de conservation, les zones à forte pente nécessitent le maintien d'un couvert forestier afin de lutter contre l'érosion et de préserver les sols. Le maintien de ce couvert forestier passe également par l'exploitation régulière et durable du bois à des fins de construction ou à des fins énergétiques. La valorisation énergétique du bois répond à l'objectif de diminution de la dépendance énergétique de l'île, notamment par la diminution des importations de charbon. Ce dernier représente 31% de l'énergie primaire consommée (BER 2013). Ainsi, l'émergence d'une filière bois-énergie est un sujet d'intérêt pour l'île et régulièrement débattu par les différentes institutions de l'île.

3.2.6. Les scénarios sélectionnés

En rappel de la méthode énoncée précédemment (§2.2.1), les objectifs des filières bioénergie à l'échelle régionale ne sont pas hiérarchisés. La sélection des scénarios est réalisée de façon à répondre à des objectifs régionaux et des modèles de filières distincts (biomasses, localisation et étendue de la filière, acteurs de la filière, etc.). Les scénarios sélectionnés seront tout d'abord décrits selon leurs chaînes d'approvisionnement puis sous la forme d'une analyse SWOT (force, faiblesse, menace et opportunités).

1. Le premier scénario concerne la valorisation des bois de palette, dans des unités de moyenne capacité et localisées à proximité des sites industriels des Bas afin d'injecter l'électricité sur le réseau mais également de pouvoir valoriser l'énergie thermique.

La chaîne d'approvisionnement s'appuie sur les sociétés de traitement de bois palettes. Les palettes déclassées sont broyées par ces sociétés et transportées jusqu'à la plateforme. Si le broyage est effectué selon les spécifications en matière de granulométrie du gazéifieur, il n'y a plus lieu de le réaliser au niveau de la plateforme. En revanche il convient de maintenir l'étape de séparation des fines, réalisée avant ou après le séchage. Après broyage, la biomasse est ensuite stockée, séchée et envoyée vers le gazéifieur. L'électricité produite sera injectée sur le réseau et l'énergie thermique pourra être valorisée pour un usage industriel d'une société localisée à proximité de la plateforme.

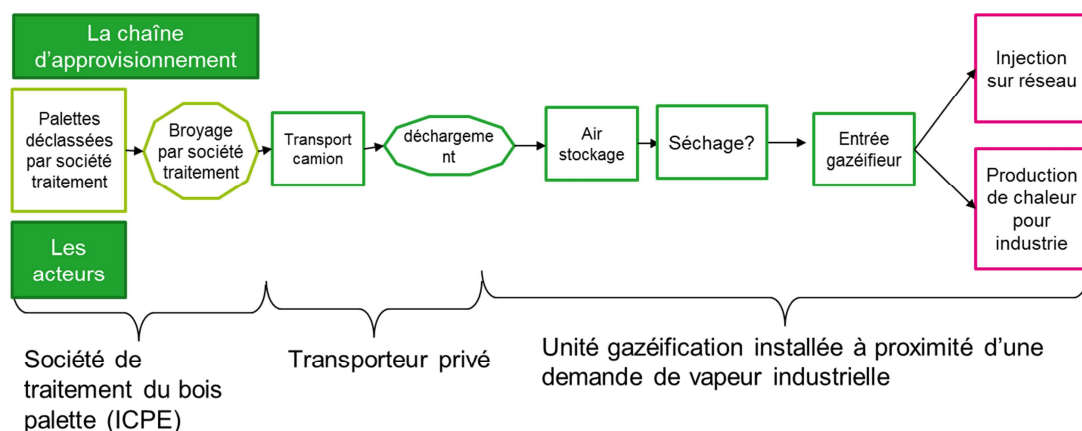


FIGURE 7 CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT ET ACTEURS DU SCÉNARIO 1 : BOIS PALETTE DANS LES BAS

Le principal atout de ce scénario est de compter sur un potentiel mobilisable de biomasse important et concentré au niveau de quelques sociétés de traitement des bois palette. Cette biomasse présente également une faible valeur marchande et peu d'usages concurrents. En revanche, les broyats obtenus sont parfois hétérogènes (éléments non organiques, bois peint) et la granulométrie ne correspond pas toujours aux spécifications des gazéificateurs. Pour les sociétés de traitement de palettes, les démarches à réaliser pour l'obtention d'une autorisation de Sortie de statut de déchets peuvent représenter une contrainte administrative. Elles s'intègrent cependant dans les démarches globales de qualité des ICPE. L'opportunité majeure de ce scénario est de participer à la valorisation énergétique des déchets, en conformité avec le projet de plan départemental de prévention et de gestion des déchets non dangereux (Conseil Général de la Réunion 2015). Le développement de ce type de filière pourrait avoir un effet d'entraînement au niveau des industries et des sociétés de traitement des bois palette, ce qui conduirait à capter davantage de palettes en fin vie. La principale menace est une conséquence directe du développement d'un marché du broyat de bois palette, avec l'augmentation probable du prix de cette biomasse, ce qui pourrait augmenter les coûts de production de l'électricité.



FIGURE 8 : SWOT DU SCENARIO 1 : BOIS PALETTE DANS LES BAS

2. Le second scénario concerne l'exploitation de l'*Acacia mearnsii*, dans de petites unités de gazéification, localisées dans les Hauts de l'Ouest et dans le cadre des projets de territoires à énergie positive (TEPOS). L'énergie produite sera valorisée sous forme d'électricité injectée sur le réseau, et l'énergie thermique pourra être valorisée sous forme de chaleur.

Sa chaîne d'approvisionnement se compose d'une première étape d'exploitation forestière de l'*Acacia mearnsii* en taillis courte rotation (TCR) de 10 ans, avec régénération naturelle. Après abattage des arbres, deux options techniques se distinguent : le bois peut être transporté brute puis broyé au niveau de la plateforme ; ou bien broyé en bord de route puis transporté sous forme de plaquettes forestières. La

première option permet de maîtriser l'étape de broyage, alors que la seconde permet de réduire les coûts de transports car le bois brut d'*Acacia mearnsii* est très foisonnant²⁰ et occupe alors beaucoup d'espace dans les caissons de transport (jusqu'au 2/3 de vide dans les caissons, d'après COPOBOIS (comm. personnelle 2015). En revanche cette seconde option nécessite un investissement supplémentaire pour un broyeur mobile et de puissance suffisamment importante pour accepter les bois de gros diamètres ou les biomasses foisonnantes. Les plaquettes sont ensuite stockées, séchées avant entrée en gazéifieur. Le bois brut doit être ressuyé (séchage naturel) puis il est broyé, séché et envoyé vers le gazéifieur. L'électricité produite est injectée sur le réseau et l'énergie thermique valorisée.

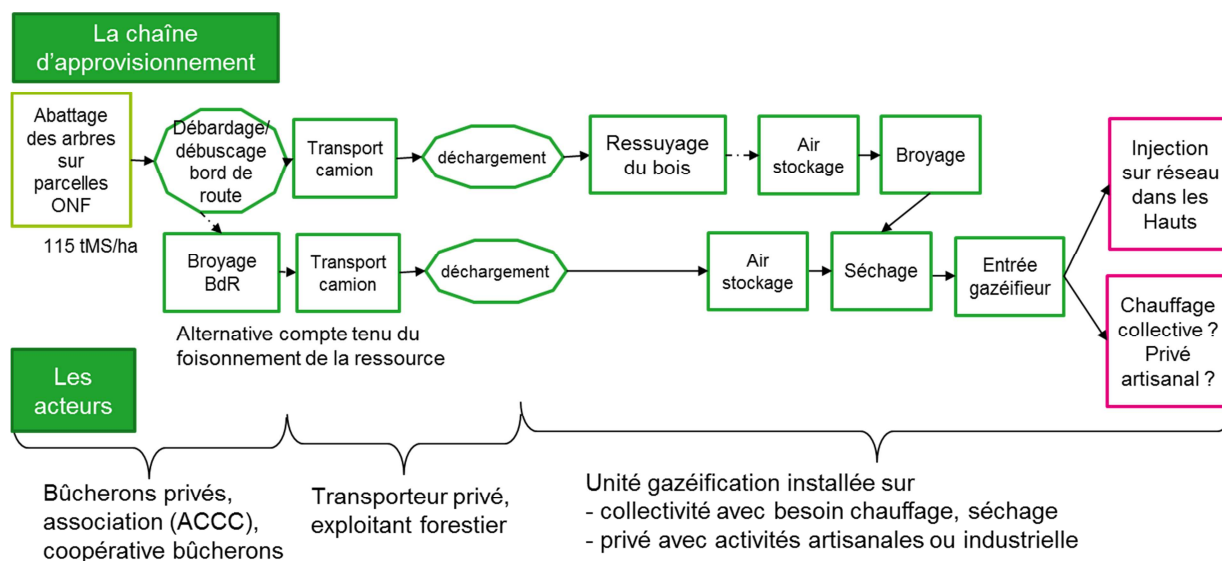


FIGURE 9 : CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT DU SCÉNARIO 2 : *ACACIA MEARNsii* DANS LES HAUTS

Les principaux atouts de ce scénario est de se baser sur une biomasse à forte productivité dont l'exploitation permet de limiter son expansion ainsi que celle d'autres espèces envahissantes (voir §3.1.2.4.2). Cependant, cette biomasse est dispersée dans l'espace et son coût d'exploitation est élevé (environ 110€/m³). Quelques acteurs ont été identifiés pour son exploitation, comprenant une petite structure de formation de bûcherons qui expriment une volonté de développer leurs activités, sous forme de coopérative par exemple. Le développement d'une telle activité d'exploitation de la biomasse et de la chaîne d'approvisionnement en bois-énergie est pourvoyeuse d'emplois. La principale opportunité de ce scénario est d'intégrer un projet TEPOS de production et de consommation locale d'énergie. Les dispositifs TEPOS retenus obtiennent un financement qui permettrait de soutenir le développement de ces filières à faible rentabilité. La principale menace concerne les restrictions réglementaires vis-à-vis de l'exploitation d'une espèce classée par arrêté préfectoral comme « espèce exotique envahissante ». Son exploitation présente pourtant un intérêt écologique et de gestion de son expansion, particulièrement dans les zones ayant été incendiées en 2011, où le recrût et l'expansion des peuplements est très forte. Cependant l'itinéraire technique adapté à cette espèce est encore à préciser, même si la phénologie de l'espèce et les expériences faites sur d'autres acacias laissent présager une conduite en TCR sans difficulté majeure.

²⁰ Le foisonnement correspond au rapport entre le volume de bois plein et le volume total occupé par le bois et le vide (appelé volume apparent). Plus la biomasse est foisonnante plus le transport est coûteux. Un coefficient de foisonnement est appliqué aux plaquettes forestières.

<p><u>Forces :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Forte productivité en biomasse • Intérêt écologique (limitation de son expansion, régulation envahissement autres espèces) • Association ACCC et volonté créer coopérative de bûcherons • Création d'emplois • Production locale de biomasse et d'énergie 	<p><u>Faiblesses :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Biomasse dispersée sur parcellaire petite dimension (< 1ha) • Coût d'exploitation et de mobilisation de la biomasse (+/-110€/m3) • Acteurs producteurs biomasse non structurés actuellement • Faible efficacité énergétique et rentabilité sur petites installations
<p><u>Opportunités :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Intégration dans projet TEPOS, demande de financement • Localisation sur zone non secourue par EDF ou en bout de ligne. 	<p><u>Menaces :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Contraintes réglementaires floues pour l'exploitation vis-à-vis du classement comme espèce invasive • Difficulté de gestion à petite échelle • Manque de connaissances sur l'itinéraire technique TCR

FIGURE 10 : SWOT DU SCENARIO 2 : *ACACIA MEARNSII* DANS LES HAUTS

Les 5 scénarios sélectionnés (4 scénarios pour la plateforme du CFPPA et 2 scénarios à l'échelle régionale) seront évalués au niveau économique (coût de production de l'électricité, valeur ajoutée) et environnemental (impacts environnementaux par analyse de cycle de vie et comparaison avec les impacts du mix électrique de l'île).

3.3. Evaluation économique

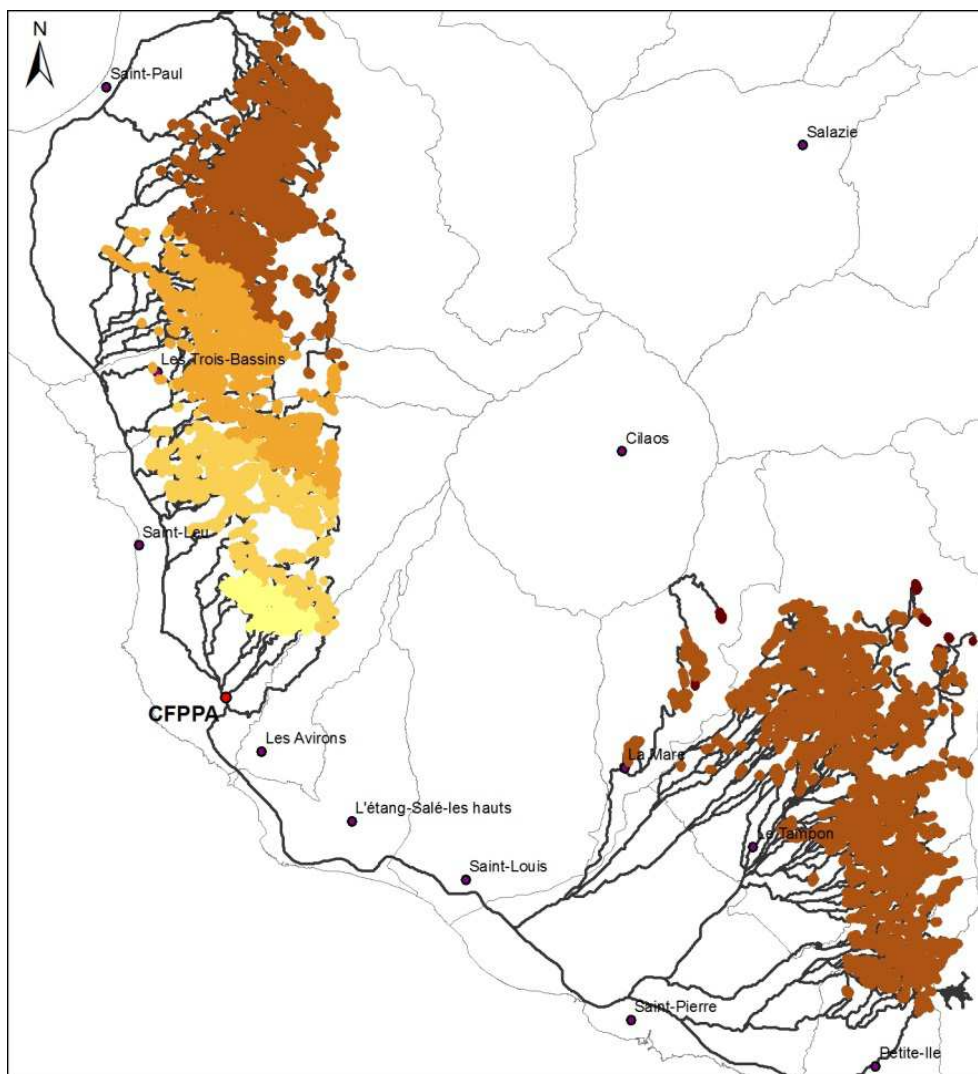
3.3.1. Scénarios CFPPA

3.3.1.2. Performances économiques des scénarios CFPPA

3.3.1.2.1. Les coûts de transport :

Les coûts de transport ont été calculés par analyse spatiale, dans un objectif de minimiser les coûts en fonction de la localisation des biomasses, des types de voies de circulation et du relief (voir méthode §2.3.1.1). Ainsi, pour le bois d'Acacia, les coûts de transport ont été calculés sur la base d'un approvisionnement de proximité (4-5 km) pour un coût total de 10 €/t.

Pour le bois d'Acacia, les coûts de transport depuis les peuplements d'Acacia sont présentés sur la carte suivante. La moyenne est de 35 €/t, avec des coûts de transport plus faibles pour les peuplements situés dans les Hauts de l'Ouest (26 €/t) que dans les hauts du Tampon (46 €/t).



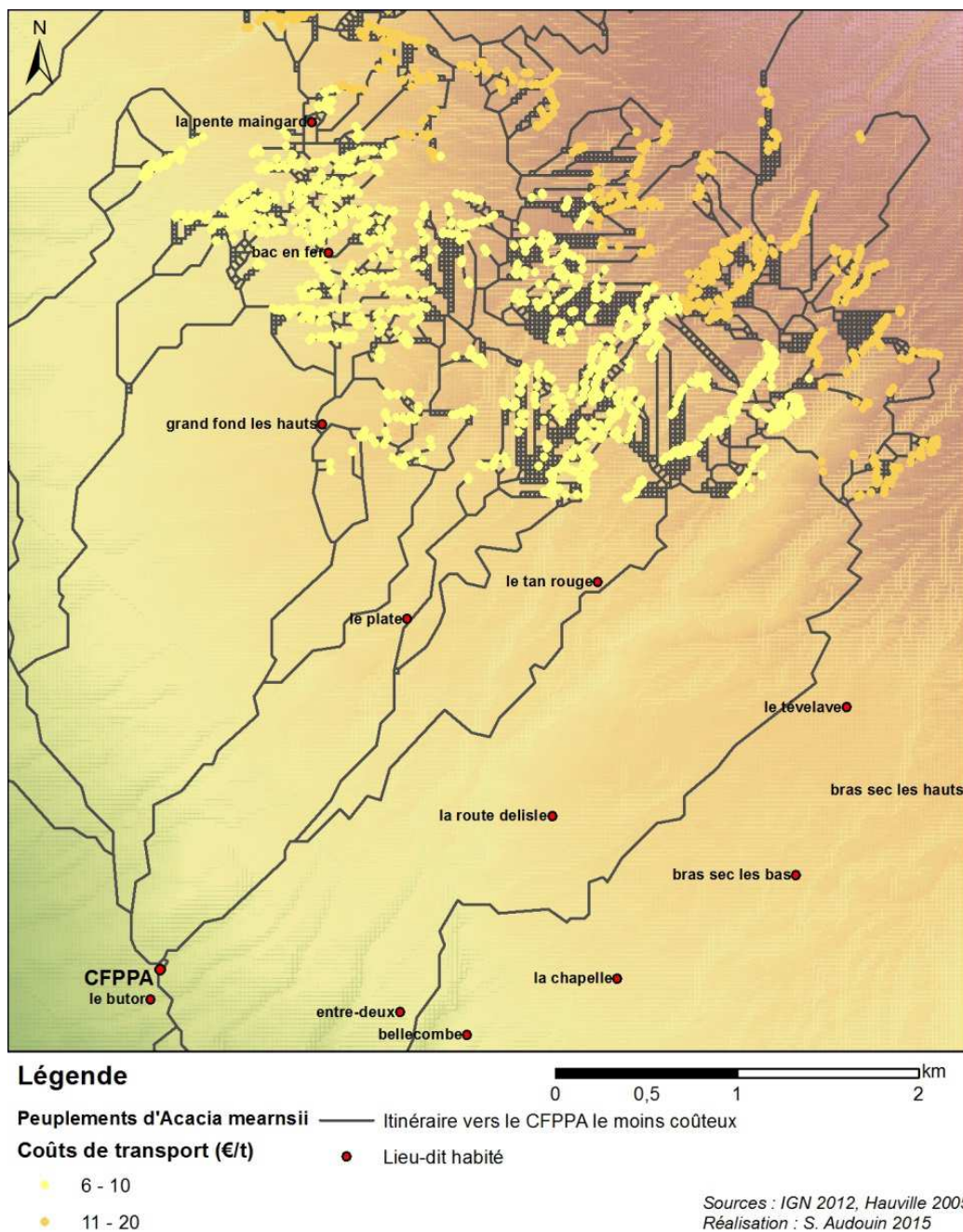
Légende

- Peuplements d'*Acacia mearnsii*** — Itinéraire vers le CFPPA le moins coûteux
- Coûts de transport (€/t)**
- 6 - 10
 - 11 - 20
 - 21 - 30
 - 31 - 50
 - 51 - 70
- CHEF_LIEU
- CFPPA
- Limites de communes

Sources : IGN 2012, Havville 2005
Réalisation : S. Audouin 2015

CARTE 4 : REPARTITION DES COÛTS DE TRANSPORT DU BOIS D'*ACACIA MEARNsii* POUR L'APPROVISIONNEMENT DE LA PLATEFORME DU CFPPA

Les peuplements localisés au Tampon présentent un coût de transport beaucoup plus élevé (31 à 50 €/t). Pour cette raison, les peuplements des Hauts de l'Ouest devront être des zones de prospection prioritaire afin de garantir la contractualisation avec les propriétaires des parcelles. Compte tenu des faibles besoins en bois pour le fonctionnement de la plateforme, un coût de transport de 10 €/t sera donc choisi pour l'évaluation économique l'approvisionnement de la plateforme du CFPPA, à partir des peuplements localisés à proximité du CFPPA (4 à 5 km), au niveau des lieux-dits suivants : « Grands fonds les hauts », « Bac en Fer », et « la Pente Maingard ».



CARTE 5 : COÛTS DE TRANSPORT DU BOIS D'ACACIA LOCALISÉ À PROXIMITÉ DU CFPPA

Pour le bois de palette, les coûts de transport sont évalués à 28 €/t. Ils sont plus élevés que ceux retenus pour le bois d'Acacia. Cette différence s'explique par les distances totales de transport qui sont trois fois plus élevées avec 30 km environ, bien que le coût de base du transport (1 €/t/km) soit plus faible, qu'il y ait peu de contrainte liée au relief et que les itinéraires routiers empruntent des voies d'accès de moindre coût (Route des Tamarins).

Pour les biomasses produites sur les parcelles agricoles du CFPPA : la paille de canne et la canne fibre, les coûts de transport ont été minimisés afin d'intégrer la possibilité que le transport soit réalisé avec les équipements du lycée agricole. Ils ont été évalués sur la base d'1€/t/km pour 1 km de distance (les parcelles étant à proximité immédiate de la plateforme de gazéification).

3.3.1.2.2. Les coûts de production :

Les coûts de production des scénarios du CFPPA sont composés de charges fixes identiques pour les deux durées de fonctionnement et de charges variables (voir Annexe 3 et Annexe 5). Les scénarios 3 (pailles de canne) et 4 (canne fibre) comportent une étape de pelletisation, ce qui implique des investissements et des charges variables supplémentaires (particulièrement la consommation électrique). Les charges variables correspondants aux frais de maintenance et aux charges de personnels varient selon les durées de fonctionnement, mais sont identiques quels que soient les scénarios. En revanche, les coûts d'achat, de transport et de préparation de la biomasse sont différents selon les scénarios.

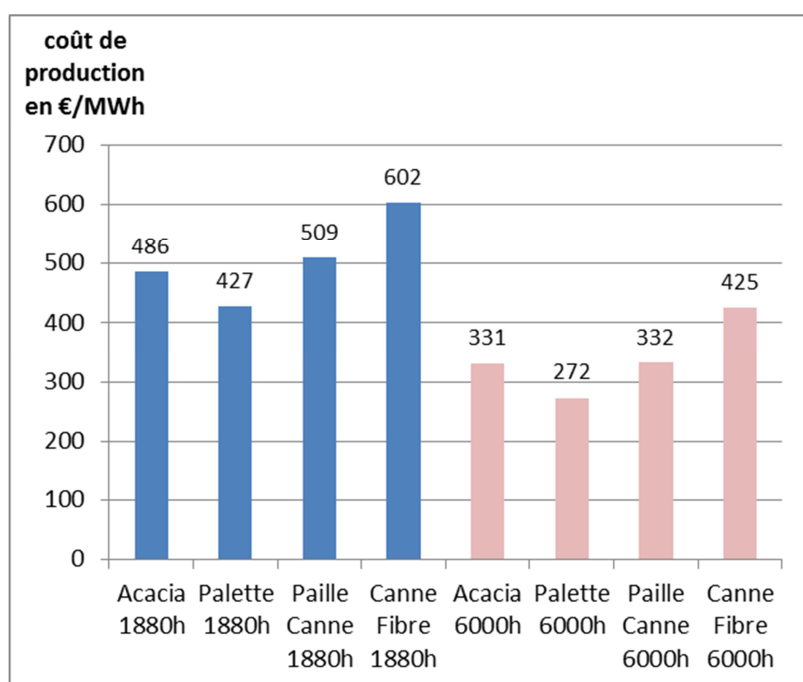
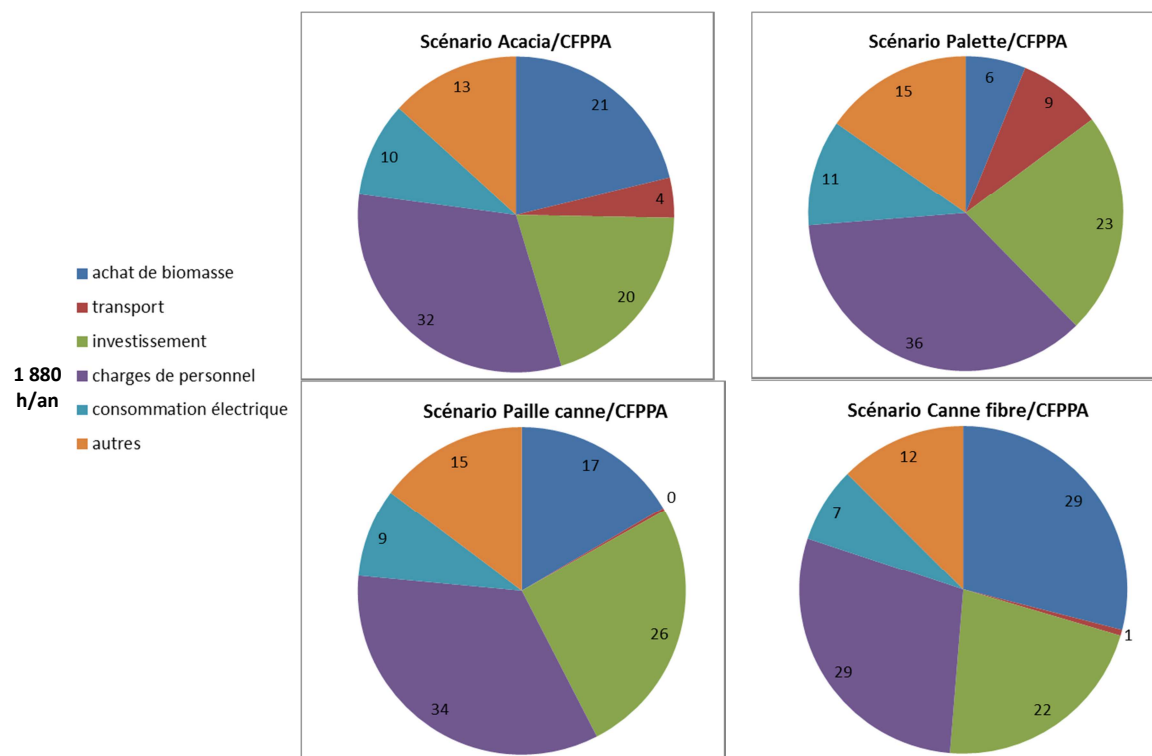


FIGURE 11: COUT DE PRODUCTION DES 4 SCENARIOS CFPPA POUR DEUX DUREES DE FONCTIONNEMENT

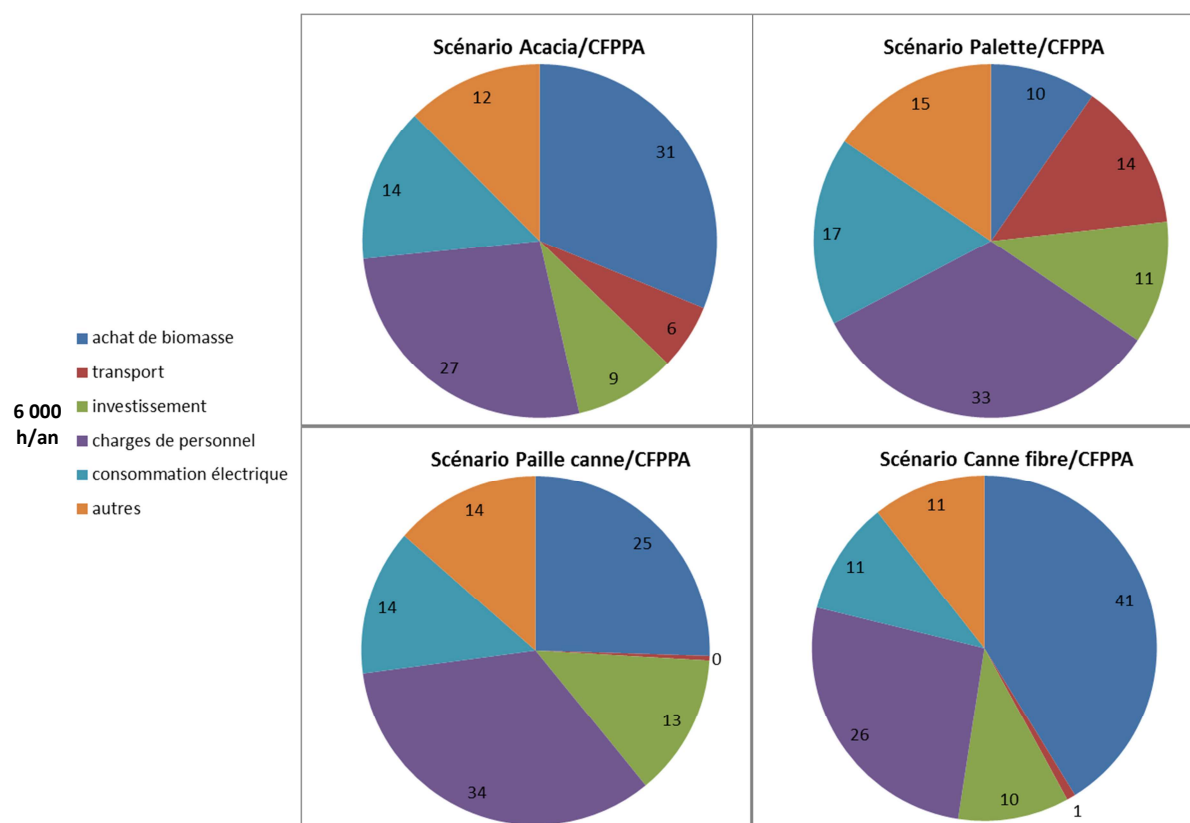
La figure ci-dessous indique que les coûts de production des quatre scénarios sont 1,7 à 2 fois plus importants pour une durée de fonctionnement de 1880h/an rapport à une durée de 6000h/an. Les scénarios basés sur un approvisionnement en bois palette présentent les coûts de production les plus faibles, avec 272 et 427 €/MWh pour des durées de fonctionnement respectives de 6 000 et 1 880h/an. La canne fibre présente un coût de production nettement plus élevé avec 425 et 602 €/MWh pour les deux durées de fonctionnement. Les scénarios basés sur un approvisionnement en bois d'acacia et en paille de canne présentent un cout de production proche, avec 331 et 486 €/MWh pour l'Acacia et 332 et 509 €/MWh pour la paille de canne.

TABLEAU 18 : DECOMPOSITION DU COUT DE PRODUCTION POUR LES 4 SCENARIOS POUR 1880H DE FONCTIONNEMENT ANNUEL



Pour une durée de fonctionnement de 1 880 h/an, la décomposition du coût de production montre que le poste de dépense le plus important est celui des charges de personnel, avec 29 à 36 % du coût de production. Pour trois des scénarios (palette, acacia et paille de canne), l'achat de la biomasse présente une charge modérée avec 6 à 21 % du coût de production. Elle est très faible pour le bois de palette avec seulement 6 %, en revanche elle devient plus conséquente pour la canne fibre avec 29 %. Pour l'ensemble des scénarios, les coûts de transport représentent une faible charge, avec 0 à 9 %. L'investissement est pris en compte par le coût d'amortissement annuel intégrant un niveau de subvention élevé (70%), mais représente une charge non négligeable dans le coût de production avec 20 à 26 % du coût de production.

TABLEAU 19 : DECOMPOSITION DU COUT DE PRODUCTION POUR LES 4 SCENARIOS POUR 6000 H DE FONCTIONNEMENT ANNUEL



En ce qui concerne la décomposition du coût de production pour une durée de fonctionnement de 6 000h/an, les postes les plus importants sont ceux de l'achat de la biomasse, ainsi que les charges de personnel. L'achat de la biomasse représente toujours une faible part du coût de production du scénario de bois palette, avec seulement 10 %. Il est revanche plus important pour les autres scénarios avec 25 à 41 %. A noter que le coût d'achat de la biomasse le plus important concerne la canne fibre (41 %), avec une dépense annuelle d'environ 25 000 €, contre seulement 3 800 € pour le bois palette. La consommation électrique des équipements auxiliaires représente le troisième poste de dépense, avec 11 à 17 %. L'importance de cette charge s'explique par le fait que l'installation soit fortement automatisée (tapis de chargement et déchargement de la biomasse broyée) et par la nécessité d'installer un groupe froid pour refroidir le syngaz avant sa combustion dans le moteur. Les coûts d'investissement ont une part beaucoup plus faible que pour un fonctionnement de 1 880h/an, car ils sont non proportionnels à la durée de fonctionnement.

3.3.1.3. Recettes et bénéfices de la plateforme du CFPPA

Les recettes issues de la vente de l'électricité s'élèvent à 1 958 €/an pour un fonctionnement de 1 880 h/an et 6 250 € pour 6 000 h/an avec le tarif actuel de rachat de l'électricité 43,4€/MWh²¹ (Tableau

²¹ D'après les tarifs d'achat de l'électricité produite par les énergies renouvelables pour la catégorie « Combustion de matières non fossiles végétales (biomasse) ». A noter qu'il n'existe pas à ce jour de tarif spécifique à la gazéification.

20). Ce tarif peut être réévalué à 96 €/MWh compte tenu de la prime accordée aux puissances inférieures à 36 kWé²² ; les recettes s'élèvent alors à 4 332 et 13 824 €/an pour les deux durées de fonctionnement.

Pour le CFPPA, il est probable que les charges assumées et les recettes perçues soient liées à la consommation d'électricité d'une part et à la revente de l'électricité d'autre part. La différence entre ces postes de dépense et de recette est négative pour le tarif d'achat de 43,4€/MWh pour les deux durées de fonctionnement (- 490 et -153 €/an pour les scénarios sans granulation, -45 et -154 €/an pour les scénarios avec granulation). Elle est en revanche positive pour un tarif de 96 €/MWh (2 220 et 7 085 €/an pour les scénarios sans granulation, 2 328 et 7 430 €/an pour les scénarios avec granulation).

Etant donné que le coût de production de l'électricité demeure inférieur aux deux tarifs d'achat éligibles, la plateforme ne peut pas dégager de bénéfices. Les pertes sont moins importantes pour les scénarios basés sur le tarif d'achat revalorisé, avec des pertes 9 à 12 % moins élevées pour 1 880h/an et 13 à 22 % moins élevées pour 6 000h/an.

TABLEAU 20 : RECETTES ET BENEFICES DE LA PLATEFORME DU CFPPA

	Scénario 1 : <i>Acacia mearnsii</i>		Scénario 2 : bois de palette		Scénario 3 : paille de canne		Scénario 4 : canne fibre	
Durée de fonctionnement (h/an)	1 880	6 000	1 880	6 000	1 880	6 000	1 880	6 000
Recettes de vente de l'électricité à 43,4 €/MWh	1 958	6 250	1 958	6 250	1 958	6 250	1 958	6 250
Recettes de vente de l'électricité à 96 €/MWh	4 332	13 824	4 332	13 824	4 332	13 824	4 332	13 824
Impact sur la facture électrique du CFPPA (prix vente électricité à 43,4 €/MWh) (€/an)	- 153	- 490	- 153	- 490	- 45	- 144	- 45	- 144
Impact sur la facture électrique du CFPPA (prix vente électricité à 96 €/MWh) (€/an)	2 220	7 085	2 220	7 085	2 328	7 430	2 328	7 430
Bénéfices avec tarif de vente de l'électricité à 43,4 €/MWh (€/an)	- 19 967	- 41 376	- 17 310	- 32 895	- 20 849	- 41 018	- 25 015	- 54 314
Bénéfices avec tarif de vente de l'électricité à 90 €/MWh (€/an)	- 17 594	- 33 801	- 14 937	- 25 321	- 18 475	- 33 443	- 22 641	- 46 740

3.3.1.4. Analyses de sensibilité

Sensibilité à la durée de fonctionnement

La durée de fonctionnement est une variable prépondérante dans le coût de production de l'électricité. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour des durées de fonctionnement de 1880 à 8 000 h/an, pour un investissement fixe sans prendre en compte le coût d'achat de la biomasse (poste proportionnel à la durée de fonctionnement²³). Les hypothèses de calcul sont identiques à celles formulées précédemment.

²² Arrêté du 13 mars 2002 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations d'une puissance inférieure ou égale à 36 kVA pouvant bénéficier de l'obligation d'achat.

²³ En supposant un coût de transport constant, ce qui suppose une forte concentration de la biomasse (ce qui est le cas pour le bois de palette, mais pourrait être questionné dans le cas du bois d'Acacia).

Les charges variables sont composées des frais de personnels et de la consommation électrique des auxiliaires qui varient selon le nombre de jours de fonctionnement. Les frais de maintenance sont en partie calculés en fonction de l'énergie produite par le gazéifieur et en partie en fonction du coût d'investissement des équipements secondaires (broyeur, séchoir).

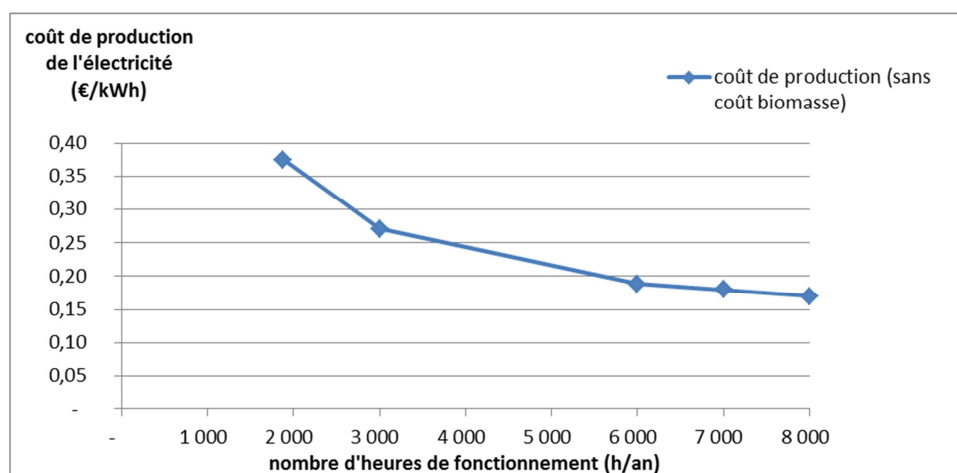


FIGURE 12 : EVOLUTION DU COUT DE PRODUCTION EN FONCTION DE LA DUREE DE FONCTIONNEMENT

L'analyse montre que le coût de production diminue fortement lorsque la durée de fonctionnement augmente. Il est divisé par un facteur 2 entre 1 880 et 6 000h. Cette analyse renforce donc l'intérêt d'augmenter la durée de fonctionnement de l'équipement.

Sensibilité à la puissance installée

La puissance installée peut également impacter fortement le coût de production de l'électricité. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour des puissances allant de 30 kWé à 500 kWé. Les coûts d'investissements ont été calculés par rapport au scénario de gazéification du CFPPA de 30 kWé. Les coûts d'investissement du gazéifieur, du broyeur et du séchoir ont été calculés de façon proportionnelle à la puissance installée, soit 6 667 €/kWé²⁴. Les coûts de transport, d'installation de l'équipement et de travaux (génie civil et voiries) sont supposés fixes. L'achat et le transport de la biomasse sont fonction de l'énergie produite et sont calculés à partir d'un approvisionnement en bois de palette et d'un transport identique aux scénarios d'approvisionnement du CFPPA.

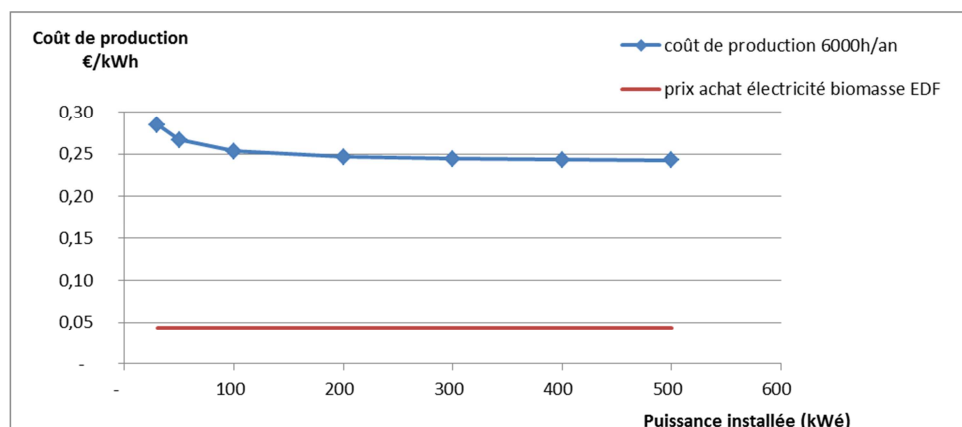


FIGURE 13 : EVOLUTION DU COUT DE PRODUCTION EN FONCTION DE LA PUISSANCE INSTALLEE

²⁴ Soit 4 500€/kWé pour le gazéifieur, conformément aux devis SPANNER

L'analyse montre que le coût de production est faiblement impacté par l'augmentation de la puissance installée. Il atteint une valeur seuil à 100 kWé. A noter que cette analyse ne prend pas en compte certaines économies d'échelle, notamment dues à l'amélioration des performances techniques (augmentation potentielle de l'efficacité énergétique lorsque la puissance installée augmente), ni les charges de personnels ou encore le coût d'investissement du gazéifieur. Ainsi, l'intégration de ces paramètres pourrait accentuer de façon conséquente la baisse du coût de production en fonction de la puissance installée.

Ces deux analyses montrent également que ni l'augmentation de la durée de fonctionnement, ni celle de la puissance installée ne permettent d'atteindre le prix d'achat de l'électricité fixé pour les installations de combustion de biomasse (4,34 c€/kWh).

3.3.2. Scénarios Région

3.3.2.2. Scénario Acacia dans les Hauts de l'Ouest

3.3.2.2.1. Localisation et dimensionnement du scénario

Afin de minimiser les coûts de transport et de répondre aux objectifs des projets TEPOS (territoires à énergie positive), l'unité de gazéification sera positionnée à proximité des peuplements d'*Acacia mearnsii* et en bout de ligne haute tension. La localisation des peuplements d'Acacia est fournie par l'inventaire réalisé par Hauville et el CIRAD (2005) à partir d'image aérienne de 2003. La localisation des bouts de ligne haute tension a été est fournie par EDF. Deux zones remplissent ces deux critères : Bernica dans les Hauts de Saint Paul (depuis le lieu-dit de Petite France, chemin Borchet puis le long de la route du Maïdo) et le Tampon (lieu-dit Notre Dame de la Paix). Deux sous-scénarios seront évalués, avec pour seule différence la valeur moyenne du coût de transport de la biomasse.

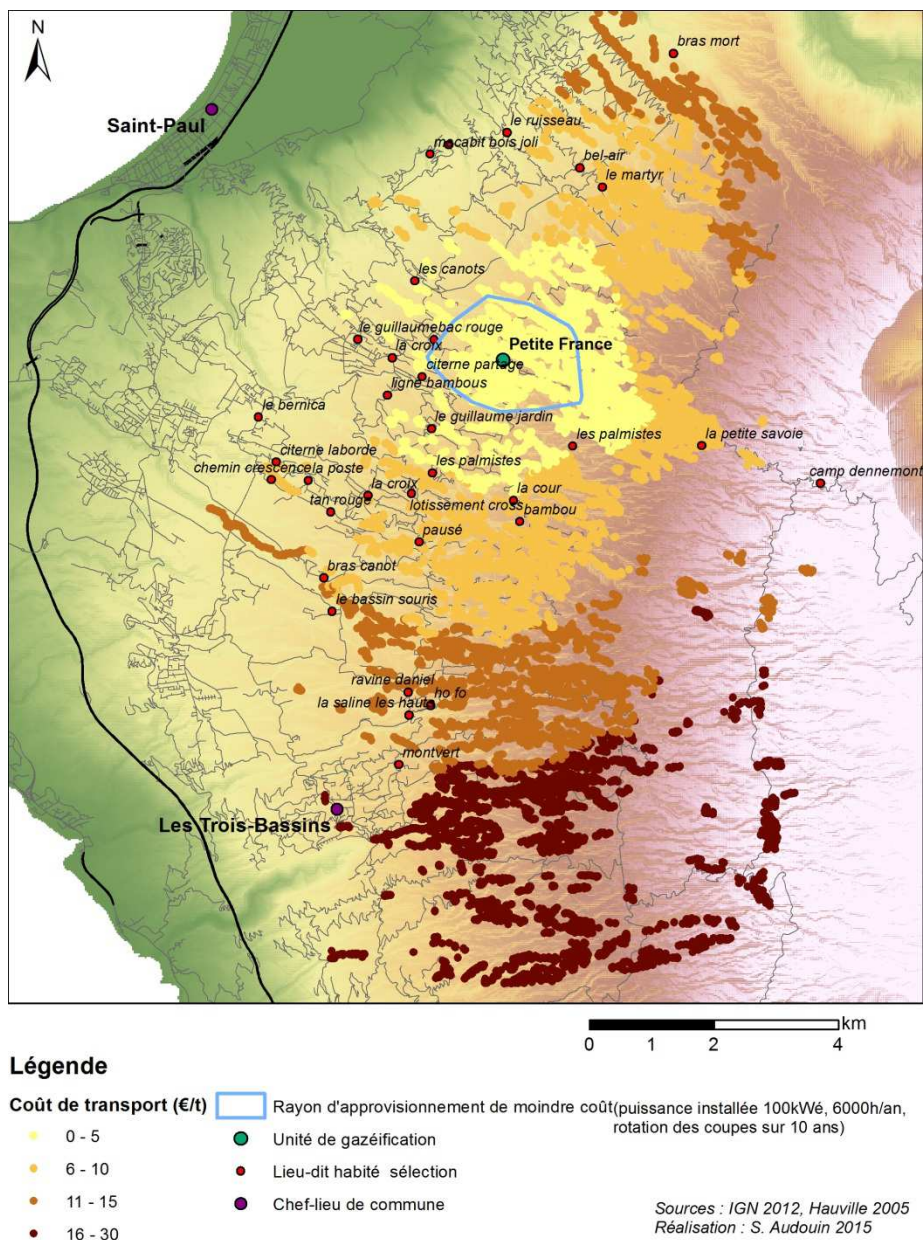
L'analyse de sensibilité du coût de production de l'électricité selon les puissances installées (§3.3.1.3) a montré qu'à partir d'une puissance installée de **100 kWé**, le coût de production atteint une valeur seuil. Cette puissance a donc été choisie pour l'évaluation économique des scénarios Acacia dans les Hauts de l'Ouest. La quantité de biomasse n'apparaît pas comme un facteur limitant, puisque les sites des unités sont choisis pour se situer à proximité d'une zone de forte concentration de peuplements d'Acacia. Avec une durée de fonctionnement de 6 000h/an, la quantité d'énergie produite est de 480 MWh/an, soit la consommation électrique d'environ 343 habitants (BER 2014, édition 2015).

3.3.2.2.2. Performances économiques des scénarios région Bois Acacia

3.3.2.2.2.1. Coûts de transport

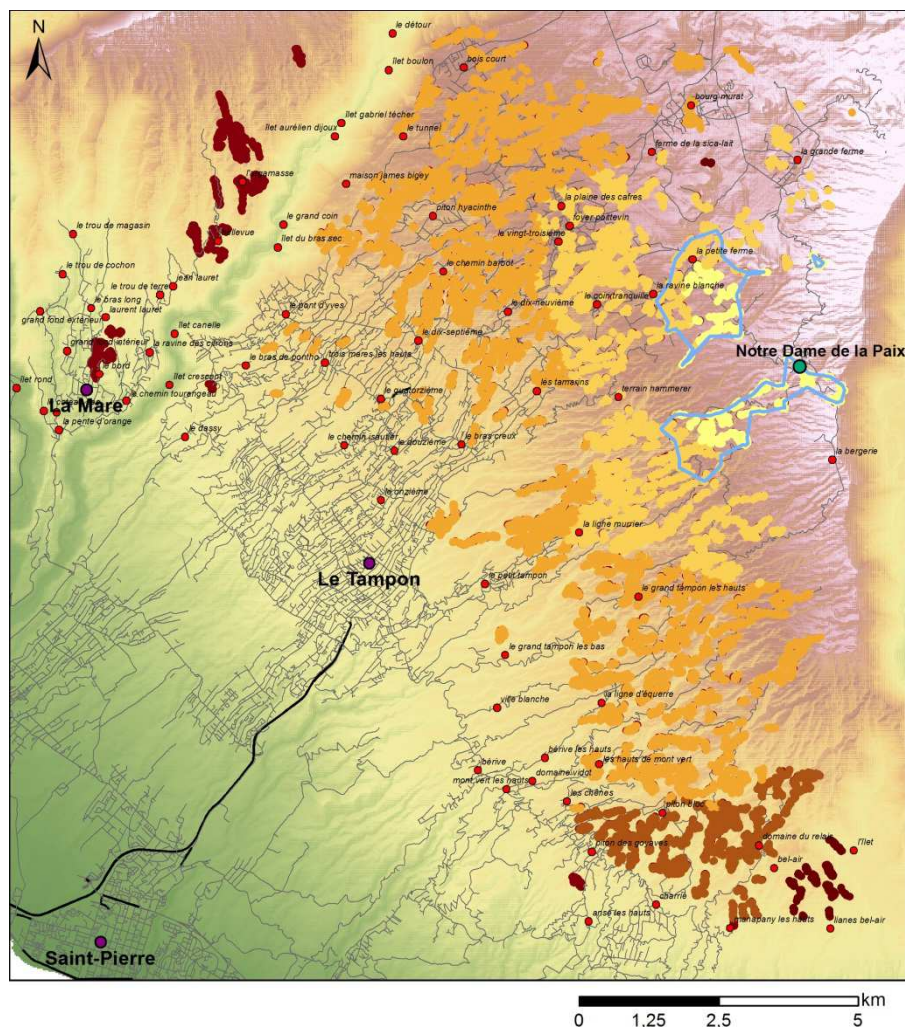
Suivant la même méthode d'analyse spatiale, les coûts de transport varient de quelques centimes à 30€/tMS. La carte ci-dessous (Carte 6) indique l'aire minimale d'approvisionnement de 4 740 tMS, nécessaires au fonctionnement d'une unité de 100kWé pour une durée de 6 000h/an avec une gestion de l'exploitation de la biomasse sur le principe de coupes en rotation de 10 ans. La quantité de bois à exploiter chaque année correspond donc au 1 :10^e de l'aire d'approvisionnement. La distance linéaire maximale entre l'unité basée à Notre Dame de la Paix et l'extrémité de l'aire est de 1,4 km. Le coût de transport moyen pour l'ensemble de l'aire d'approvisionnement est de 1,44 €/tMS, cette valeur sera retenue pour l'évaluation du coût de production.

De façon similaire aux scénarios basés sur un approvisionnement en bois d'Acacia pour la plateforme du CFPPA, il est à noter que le morcellement du parcellaire et le grand nombre de propriétaires impliquent un surcoût et une contrainte à la disponibilité de ces biomasses qui n'ont pas été prises en compte dans cette évaluation.



CARTE 6 : REPARTITION DES COÛTS DE TRANSPORT POUR LE SCENARIO ACACIA REGION A PETITE FRANCE

Pour le site de Notre Dame de la Paix, la répartition des coûts de transport est représentée sur la carte suivante (Carte 7). Les coûts de transport sont légèrement plus élevés, avec peu de peuplements dont les coûts de transport correspondent aux coûts les plus faibles (0 à 5€/t). Les coûts de transport moyens de l'aire d'approvisionnement correspondant à une exploitation annuelle de 474 tMS basée sur une gestion des coupes par rotation de 10 ans, s'élèvent à 4,3 €/tMS. La distance linéaire maximale entre l'unité basée à Notre Dame de la Paix et l'extrémité de l'aire est de 3 km.



Légende

Coût de transport de l'Acacia (€/t)	Rayon d'approvisionnement de moindre coût pour une puissance installée de 100kWé
0 - 5	
6 - 10	
11 - 20	
21 - 30	
31 - 50	
	● Chef-lieu de commune
	● Unité de gazéification
	● Lieu-dit habité

Sources : IGN 2012, Hauville 2005
Réalisation : S. Audouin 2015

CARTE 7 : REPARTITION DES COUTS DE TRANSPORT POUR LE SCENARIO ACACIA REGION A NOTRE DAME DE LA PAIX

3.3.2.2.2. Le coût de production

Les coûts de production des scénarios de gazéification à l'échelle région à partir d'Acacia s'élèvent à 215 et 220 €/MWh pour le site de Petite France, avec des taux de subvention respectifs de 50 et 0%. Pour le site de Notre Dame de la Paix, les coûts de production sont légèrement plus élevés, avec 234 et 240 €/MWh pour les deux taux de subvention considérés. Le coût de production est plus élevé du fait de distances de transport plus importantes (4,3€/tMS contre 1,4€/tMS pour le site de Petite France). Les valeurs obtenues sont plus faibles que celles des scénarios de la plateforme du CFPPA.

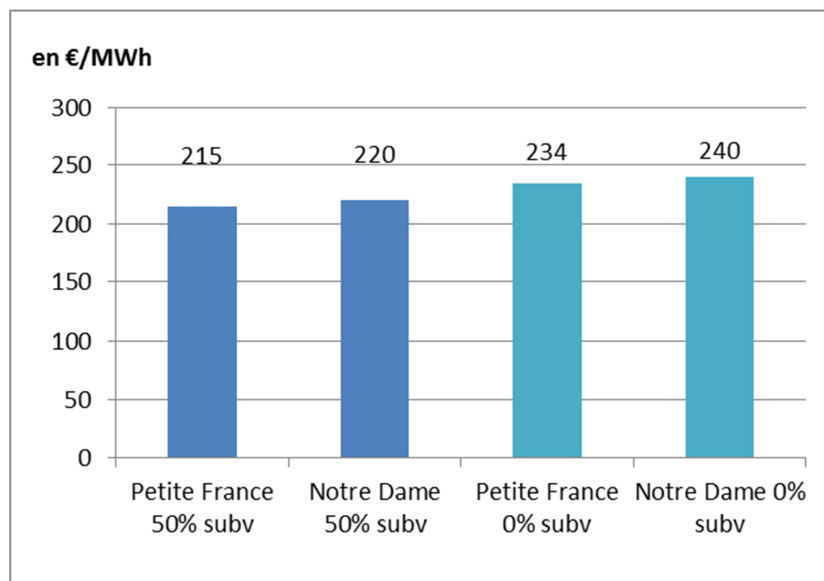


FIGURE 14 : COUTS DE PRODUCTION DES SCENARIOS ACACIA REGION

La décomposition du coût de production (Figure 15) indique qu'achat de la biomasse représente le poste de dépense le plus important, avec 44 % du coût de production. La consommation électrique des auxiliaires arrive en seconde position dans les charges variables, avec 18 % du coût de production. Les coûts de transport et coûts d'investissement ont un faible poids dans le coût de production, avec 1 et 9 %.

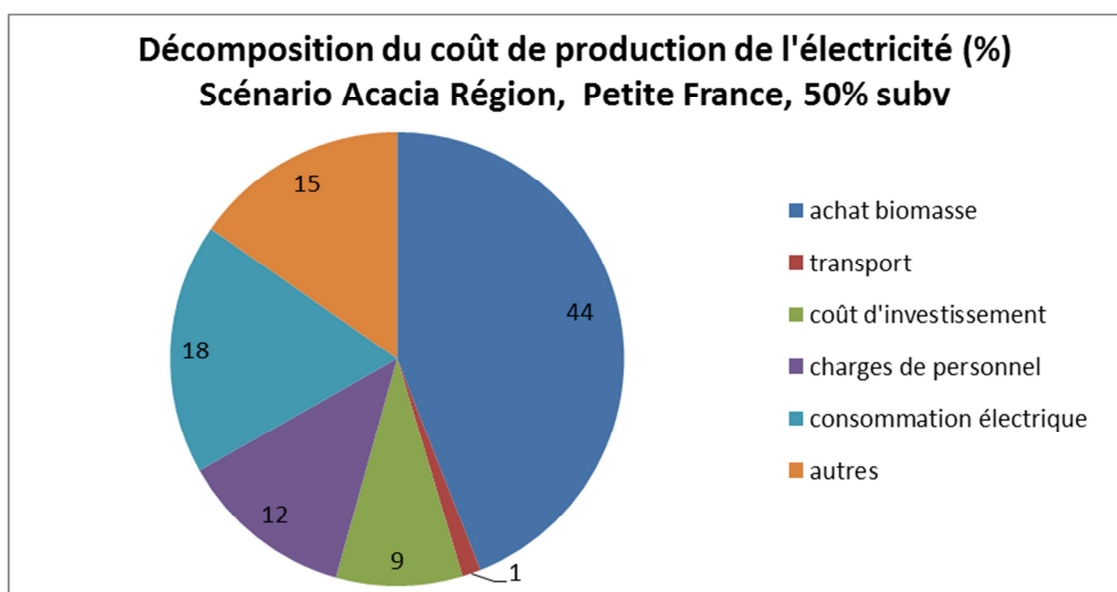


FIGURE 15 : DECOMPOSITION DU COUT DE PRODUCTION POUR LE SITE DE PETITE FRANCE AVEC 50% DE SUBVENTIONS A L'INVESTISSEMENT

3.3.2.3. Scénario Bois Palette dans les bas de l'Ouest

3.3.2.3.1. Localisation du scénario

La localisation du scénario est déterminée de façon similaire au scénario bois Acacia : l'unité de gazéification est positionnée à la fois à proximité de zones de production de biomasse, c'est-à-dire les unités de transformation de bois palette, de façon à réduire le coût de transport et à la fois à proximité de

la demande en énergie, c'est-à-dire d'une demande industrielle de chaleur. Contrairement au scénario précédent, la demande en électricité n'est pas déterminante dans ce scénario car elle peut être injectée à n'importe quel point du réseau.

Deux zones réunissent ces deux conditions :

- la zone industrielle du Port, qui présente à la fois les stations de traitement des palettes (Métal Réunion et AC2V) et une zone industrielle. Bien que la demande en énergie thermique n'ait pas été caractérisée pour chacune des entreprises, nous posons l'hypothèse que la concentration d'industries (agroalimentaires notamment²⁵) permet de supposer une demande potentielle en énergie thermique.
- La zone de Saint-André, avec une société de traitement de Bois palette (1 000 t/an de broyat de bois palette) et deux grandes sociétés qui pourraient valoriser l'énergie thermique (Royal Bourbon Industries et Sucrerie de Bois Rouge).

La zone de Saint Pierre n'a pas été retenue ; elle présente également une forte concentration d'industries agro-alimentaires mais pas de station de traitement de bois palette retenues dans le potentiel disponible localisée à proximité.

Pour des raisons de simplification et afin de proposer un scénario plus contrasté et de plus grande puissance installée, un seul scénario sera proposé. Il sera localisé au niveau du Port, avec une puissance installée de **500 kWé** (pour une consommation de 3 200 t/an de bois palette). L'unité permettra de produire 2,4 GWh/an et 1,3 GWh d'énergie thermique sous forme de vapeur (durée annuelle de fonctionnement 6 000h).

3.3.2.3.2. Performances économiques des scénarios région Bois palette

3.3.2.3.2.1. Coûts de transport

Le coût de transport est évalué à 0,5 €/t pour les palettes provenant de Métal Réunion et 3,4 €/t pour celles provenant de AC2V. Entant donné le faible coût de transport pour les palettes de Métal Réunion et la forte disponibilité la biomasse produite sur ce site, les coûts de transport seront fixés à 0,5 €/t.

3.3.2.3.2.2. Le coût de production

Le coût de production de l'électricité pour le scénario basé sur un approvisionnement en bois de palette s'élève à 178 €/MWh avec 50% de subventions à l'investissement et 193 €/MWh sans subventions (Figure 16 et Annexe 7). Ce coût est plus faible que ceux des scénarios de la plateforme de gazéification du CFPPA ou que ceux basés sur un approvisionnement en bois d'Acacia à l'échelle régionale. De plus, il est proche du prix d'achat pour les centrales à bagasse, fixé entre 155 et 170 €/MWh selon la puissance installée²⁶.

²⁵ Industries agroalimentaire telles que la transformation de poisson (SAPMER, SAM), industries laitières (SORELAIT), de panification (Pain St Rolan), d'aliments pour animaux (URGA, PAA) ou de fabrication de boisson (SEDES) (Agreste La Réunion 2013)

²⁶ 170 €/MWh pour une puissance installée inférieure à 10MW, 155 €/MWh pour une puissance installée supérieure à 30 MW. Délibération de la Commission de régulation de l'énergie du 19 novembre 2009 portant avis sur le projet d'arrêté fixant les conditions d'achat de l'électricité produite à partir de biomasse issue de canne à sucre.

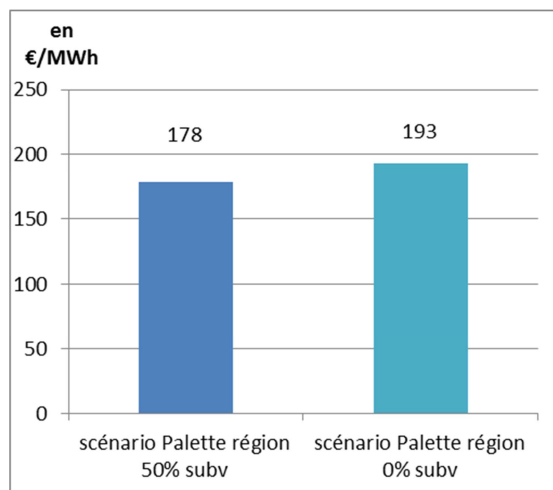


FIGURE 16 : COUT DE PRODUCTION DES SCENARIOS PALETTE REGION AVEC 50 ET 0% DE SUBVENTION A L'EQUIPEMENT

La décomposition du coût de production indique que la part du coût d'achat de la biomasse est assez faible, avec 16 % du coût de production ; comparé au scénario bois d'Acacia Région où elle représente 44 % du coût. La charge la plus importante est celle des coûts de personnels, avec 35 %, puis celle de la consommation électrique des auxiliaires avec 22%. Les coûts de transports représentent une très faible part, ce qui est dû à l'organisation spatiale de la filière dont les distances de transport ont été minimisées entre zones de production et de valorisation de la biomasse.

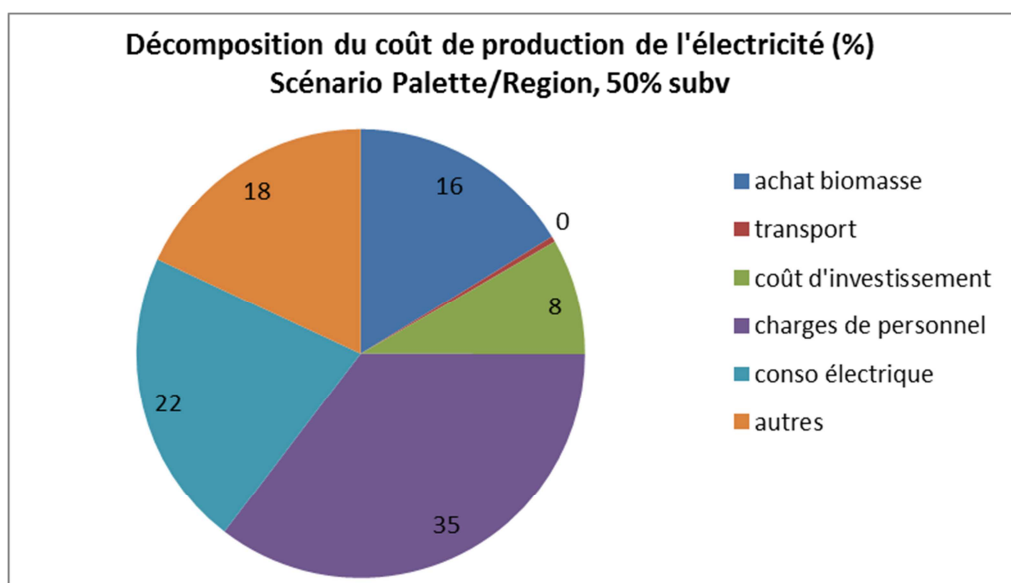


FIGURE 17 : DECOMPOSITION DU COUT DE PRODUCTION POUR LE SCENARIO BOIS PALETTE REGION

3.4. Analyse de Cycle de Vie des scénarios

3.4.1. Définition des limites des systèmes

3.4.1.1. Scénarios de référence : mix électrique réunionnais et production d'électricité à partir charbon/fioul

Deux scénarios de références seront utilisés : le mix électrique réunionnais et la production d'électricité à partir de charbon et de fioul.

Le mix électrique répond à une situation de référence réelle, permettant une comparaison avec la situation actuelle. Les impacts environnementaux sont ventilés en fonction de la part de chaque type d'énergie primaire utilisée, d'après le BER 2014 (voir Tableau 24 pour la composition du mix électrique, et Annexe 14 pour les impacts environnementaux).

La production d'électricité à partir de charbon est une comparaison plus fine des impacts de l'électricité issue de gazéification par rapport aux impacts de l'électricité issue du mix électrique. Cette comparaison permet d'estimer les économies d'impact attendues en cas de développement plus important des filières de gazéification, compte tenu du fait qu'elles ont pour vocation à se substituer au charbon dans le mix électrique.

3.4.1.2. Scénarios CFPPA

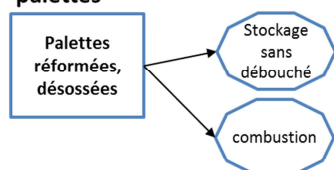
3.4.1.2.1. Scénarios gazéification 1 : Bois palette

Le système ne prend pas en compte la vie de la palette en tant que support de transport et de logistique. En effet, les impacts liés aux cycles de production et d'utilisation de la palette seront liés à une autre fonctionnalité, qui correspond au transport de marchandises. Les limites du système débutent à partir du déclassement des palettes en déchet. Il inclut donc le broyage de la palette sur les plateformes de traitement de bois palette, le transport du broyat jusqu'à la plateforme de gazéification du CFPPA, le séchage, la gazéification et l'injection sur le réseau électrique.

Les impacts de la ressource considèrent le scénario de référence de non-valorisation énergétique de la palette. Dans la plupart des cas, les palettes déclassées et broyées sont peu valorisées et sont entreposées à même le sol. De plus, des incendies sont régulièrement constatés sur des stocks de palettes déclassées. L'impact de la mobilisation de la ressource pour la gazéification intégrera donc les émissions évitées par l'absence de combustion des palettes. Dans le cas du scénario de référence comme dans le scénario de gazéification, les impacts du stockage sont identiques et ne seront pas comptabilisés.

Filière 1 : Broyat Bois Palette / AC2V ou Metal Réunion /CFPPA

Scénario de référence : absence de valorisation énergétique des palettes



Scénario : valorisation énergétique des palettes

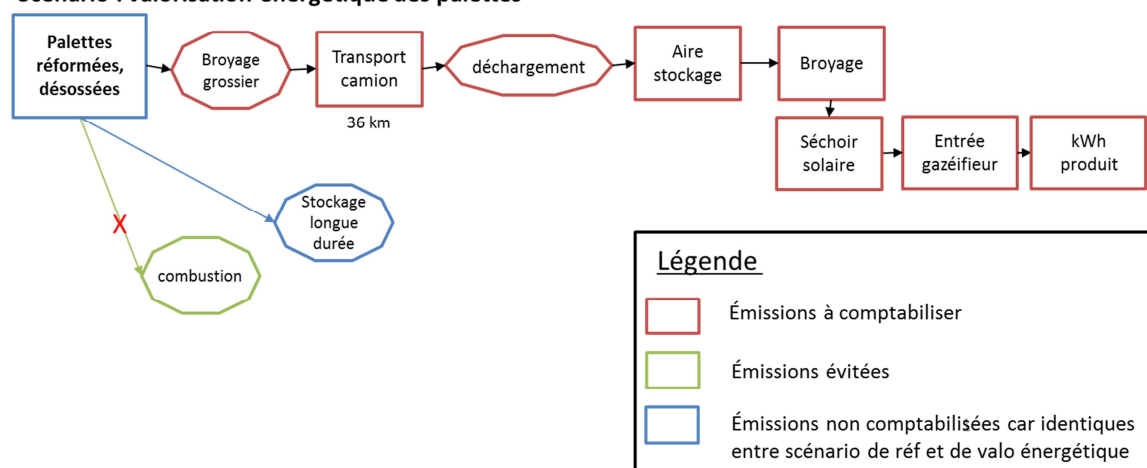


FIGURE 18 : LIMITES DU SYSTEME ACV POUR LE SCENARIO PALETTE

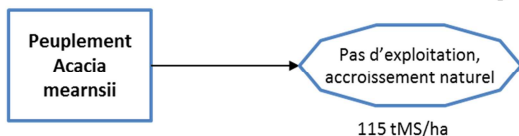
3.4.1.2.2. Scénario gazéification 2 : Bois d'*Acacia mearnsii*

Le système débute par l'exploitation des peuplements matures d'*Acacia* sur les terres des hauts de l'Ouest. Puis, les émissions liées à la croissance et l'exploitation par coupe rase après 10 années de croissance ligneuse ainsi que les émissions de l'ensemble des activités de la chaîne d'approvisionnement de la plateforme (transport, pré-traitements de la biomasse) jusqu'à la gazéification et l'injection de l'électricité sur le réseau sont comptabilisées.

Les impacts de la ressource intègrent un scénario de référence, où les peuplements d'*Acacia* ne sont pas exploités. Les principaux impacts à comptabiliser sur l'étape de production de la ressource concernent essentiellement le stockage de carbone biogénique, c'est-à-dire le carbone atmosphérique stocké dans les végétaux grâce à la photosynthèse. Les peuplements ou plantations forestières représentent donc un puits de carbone. Le scénario de valorisation énergétique des peuplements d'*Acacia* se base sur une exploitation tous les 10 ans. Les impacts considérés correspondent donc à la différence de stockage cumulé du carbone entre un peuplement mature et un taillis de 10 ans. Les impacts environnementaux liés au caractère invasif de l'espèce, qui constitue un aspect non intégré à l'heure actuelle dans les méthodes disponibles d'évaluation des impacts de cycle de vie, ne seront pas comptabilisés.

Filière 2 : Acacia mearnsii

Scénario de référence : absence de valorisation énergétique du bois



Scénario : valorisation énergétique du bois

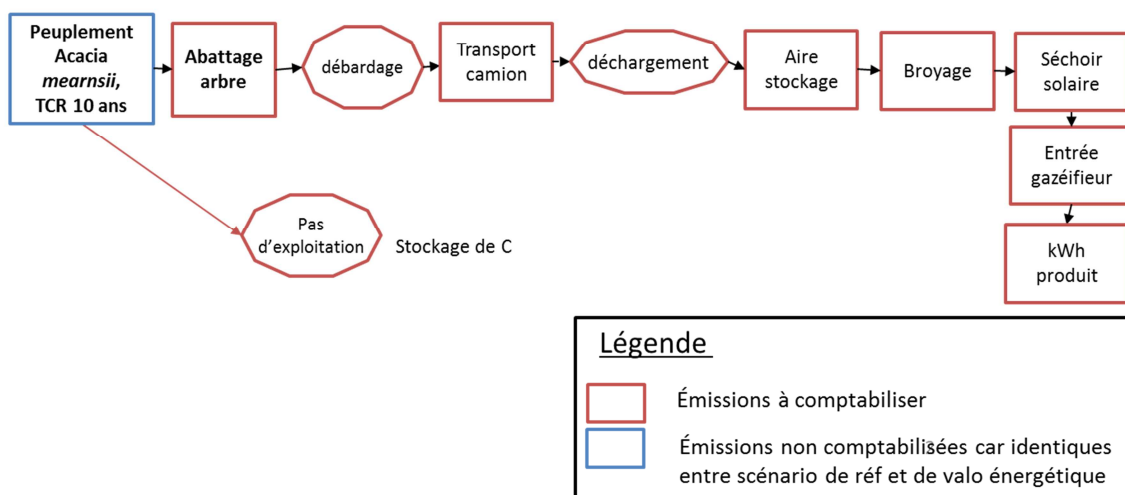


FIGURE 19 : LIMITES DU SYSTEME ACV POUR LE SCENARIO ACACIA

3.4.1.2.3. Scénario gazéification 3 : Pailles de canne à sucre produites par le CFPPA

Le système débute par la récolte et la mobilisation des pailles, les activités de pré-traitement de la biomasse (granulation), puis la gazéification et l'injection de l'électricité sur le réseau.

Les impacts liés à la production des pailles sur la parcelle du CFPPA se basent sur le scénario de référence suivant : les pailles sont laissées au champ ou bien sont exportées aux 2/3 pour un usage destiné à l'élevage. Dans le second cas, afin de ne pas priver l'élevage de ressources fourragères, l'exportation des pailles pour un usage énergétique implique de prélever les pailles sur d'autres parcelles. *In fine*, le scénario de référence considère toujours l'exportation de pailles sur une parcelle où les pailles étaient auparavant laissées au sol. Pour rappel, l'évaluation des potentiels disponibles et mobilisables de paille de canne tient compte des prévisions l'accroissement du cheptel bovin pour une demande en paille estimée à 15 000 t. Le scénario de valorisation énergétique des pailles, implique donc de comptabiliser les émissions supplémentaires liées à 1/ la valorisation énergétique des pailles des parcelles du CFPPA (parcelles « A ») à partir de l'étape de prélèvement des pailles, 2/ le transport des pailles des parcelles A vers la plateforme, ainsi que 3/ l'exportation des pailles sur de nouvelles parcelles (parcelles « B », mécanisable) pour approvisionner les élevages. La distance de transport entre la parcelle A et les lieux d'élevage étant supposée égale à la distance entre la parcelle B et les lieux d'élevage ; les émissions liées sont donc compensées. Des émissions évitées sont comptabilisées, liées aux émissions dans le sol, l'eau et l'air issues de la dégradation du mulch de pailles de la parcelle B, inférieures de 2/3 par rapport au scénario de référence. Sur ce dernier point, en absence de données disponibles nous ne considérerons pas d'interaction biologique ou biochimique entre le taux de dégradation et l'épaisseur du mulch de paille. Par ailleurs, d'après les personnes ressources du secteur, l'exportation de 2/3 des pailles correspondrait à la limite maximale permettant de ne pas augmenter les moyens de luttés contre les

adventices. En dehors de l'étape de mise en balle des pailles, l'itinéraire technique de la production de canne sur la parcelle B ne sera donc pas modifié suite à l'exportation de 2/3 des pailles. Sur les parcelles du CFPPA, les activités de prélèvement des pailles entre le scénario de référence et celui de valorisation énergétique sont considérées comme identiques.

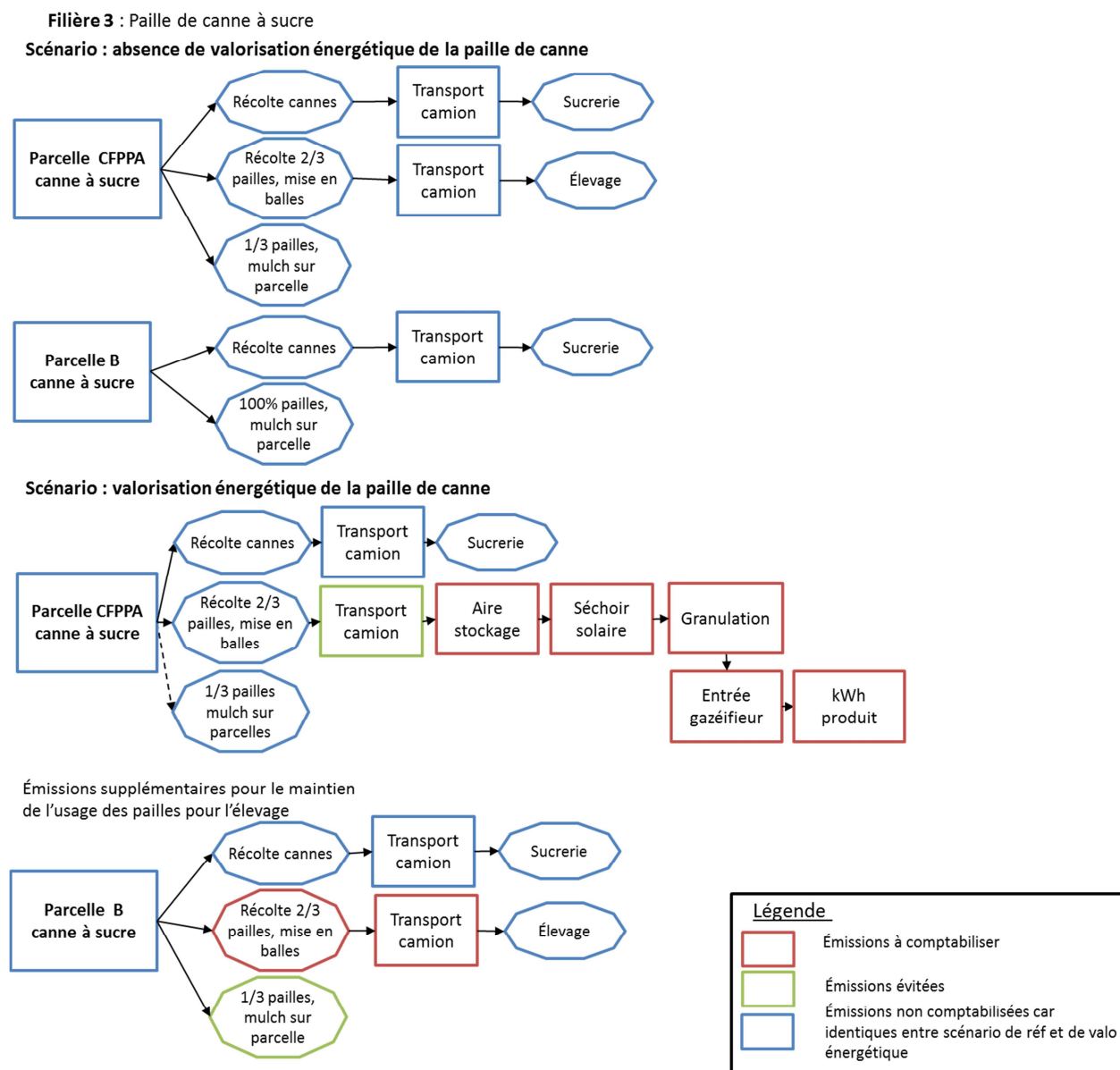


FIGURE 20 : LIMITES DU SYSTEME ACV POUR LE SCENARIO PAILLE DE CANNE

3.4.1.2.4. Scénario gazéification 4 (optionnel) : Canne fibre produite sur le CFPPA

Le scénario de valorisation énergétique de la canne fibre débute par la production agricole de la canne fibre, puis intègre les émissions liées à sa récolte, l'ensemble des pré-traitements et enfin la gazéification et l'injection de l'électricité sur le réseau.

La démarche utilisée est différente dans le cas de la canne fibre, dans le sens où les conséquences de la mise en place d'une valorisation énergétique de la canne fibre sur d'autres secteurs d'activités ne sont pas inclus. En effet, deux hectares des surfaces actuellement cultivées en canne à sucre pourront être testées

pour la production de canne fibre et pour sa valorisation énergétique. Le scénario prospectif devrait en théorie intégrer la conversion agricole de la production de canne à sucre à la production de canne fibre sur les surfaces du CFPPA et ses conséquences. Cependant, l'impact de cette conversion n'a que peu de sens à l'échelle du CFPPA, étant donné les faibles quantités concernées ; la modélisation de l'ensemble des conséquences du développement de la canne fibre sur la filière sucre ainsi que sur la filière alcool est encore largement incertaine à ce jour, et doit être pensée à l'échelle de l'île. Par conséquent, l'étude se limitera à la comptabilisation des émissions pour chaque étape de production, et ne se basera plus sur la différence entre un scénario de référence et un scénario prospectif. L'itinéraire technique agricole sera supposé identique à celui de la canne à sucre, compte tenu des essais agronomiques en cours sur cette culture et de la construction progressive d'un référentiel technique.

Il est à souligner que ce changement de démarche rend les résultats de l'ACV de la valorisation énergétique de la canne fibre difficilement comparables avec ceux des autres filières de gazéification. Cette méthode ne permet pas de prendre en compte l'impact de l'implantation de la canne fibre sur le CFPPA, mais seulement l'impact des activités liées à la production et à la valorisation de la canne fibre, sans référence à une situation existante ou future. De plus, ces résultats ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble de la Région.

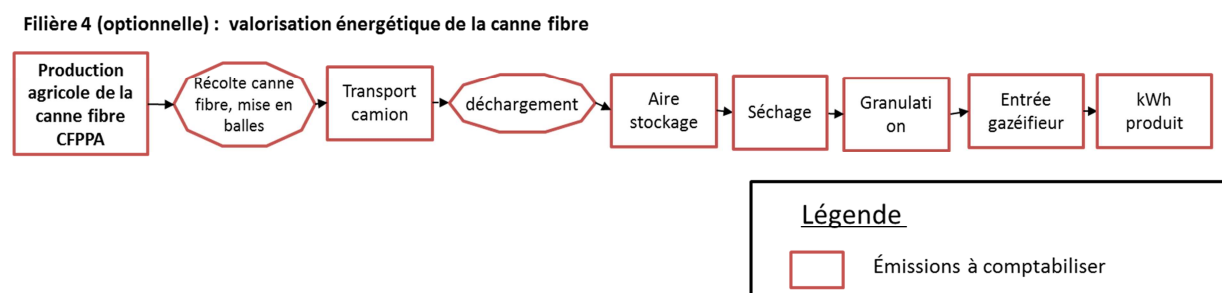


FIGURE 21 : LIMITES DU SYSTEME ACV POUR LE SCENARIO CANNE FIBRE

3.4.1.3. Scénarios à l'échelle régionale

Pour rappel les deux scénarios retenus pour l'évaluation à l'échelle régionale sont les suivants :

- Bois de palette issu de stations de traitement des bois de palette. Unité de gazéification de moyenne capacité, localisée dans les Bas, à proximité de site industriels susceptibles de valoriser l'énergie thermique co-produite.
- Bois d'*Acacia mearnsii*, biomasse mobilisée et énergie produite localement. Unité de gazéification de petite capacité, localisée dans les Hauts de l'Ouest et en bout de ligne haute tension du réseau électrique.

Les deux scénarios répondent à des objectifs distincts ; les acteurs concernés, l'emprise spatiale et la puissance installée sont différents. En revanche, les hypothèses concernant la définition des systèmes pour l'ACV seront identiques à celles formulées pour les scénarios du CFPPA des biomasses correspondantes.

3.4.2. Description des systèmes

3.4.2.1. Scénarios Acacia, palette et paille de canne sur le site du CFPPA

Les paragraphes suivants décrivent le système étudié pour l'ACV des trois scénarios sélectionnés (Acacia, Palette et Pailles de canne), ainsi que les principales hypothèses posées pour la modélisation et les données de référence retenues. Les processus appelés successivement dans le système, depuis les

conséquences de la mobilisation de la biomasse jusqu'à la production d'électricité, seront décrits pour chacun des trois types de biomasse (Figure 22).

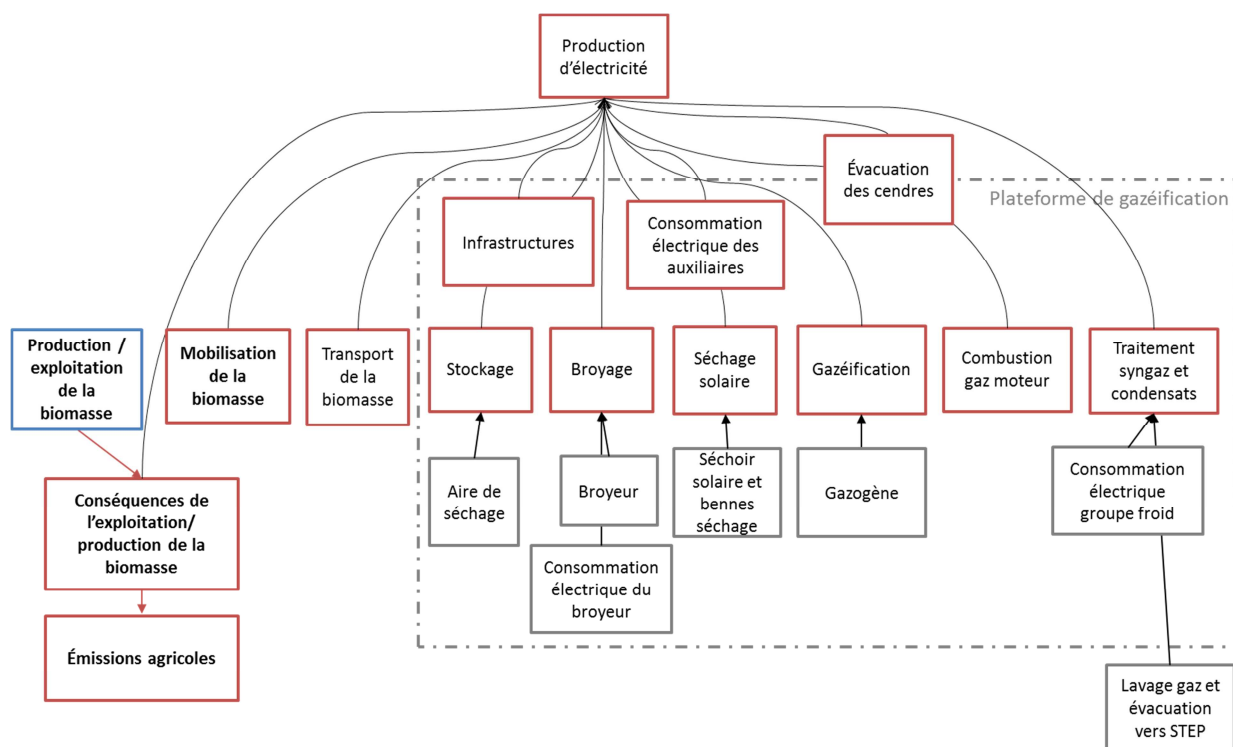


FIGURE 22 : REPRESENTATION DE LA MODELISATION DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE A PARTIR DE BIOMASSE POUR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Le système canne fibre sera présenté à la suite (§3.4.2.3), car comme mentionné dans la méthode, le scénario canne fibre ne prend pas en compte les conséquences de l'exploitation de cette biomasse et la modélisation du cycle de vie est donc différente des autres scénarios étudiés.

3.4.2.1.1. Les conséquences de l'exploitation ou de la production de la biomasse

D'après l'approche méthodologique retenue, les limites du système sont étendues afin de prendre en compte les conséquences liées à l'exploitation de la biomasse.

3.4.2.1.1.1. Acacia

Dans le cas de l'*Acacia mearnsii*, le système inclut le fait d'exploiter les peuplements d'*Acacia mearnsii* comparé à un système de référence dans lequel l'*Acacia* n'est pas exploité. Ceci induit de comptabiliser les émissions relatives à la différence de stock de carbone entre l'exploitation en taillis courte rotation sur 10 ans et la non-exploitation de ces peuplements. Les calculs sont effectués sur la base de la méthode du GIEC. Le principe de méthode est de comptabiliser les pertes de carbone à la suite d'un changement d'occupation du sol et de le convertir en émission de CO₂ équivalent. Cette méthode est reconnue par les standards internationaux de l'ILCD, bien qu'elle ne permette pas la différenciation entre carbone biogénique et carbone fossile.

L'évaluation de la perte de carbone suite à l'exploitation des plantations de d'*Acacia* repose sur la modélisation de la croissance ligneuse des peuplements. En absence de données disponibles et spécifiques aux écosystèmes de la Réunion, nous considérerons un accroissement linéaire des peuplements avec un stock de matière sèche à 10 ans correspondant au stock d'un peuplement mature,

soit 115tMS/ha (voir partie évaluation du potentiel de biomasse §3.1.2.4). La figure ci-dessous représente la perte de carbone par hectare, soit 28,8 tC/ha. L'émission de CO₂eq est ensuite amortie sur une durée de 20 ans, valeur consensuelle reconnue par l'ILCD concernant les transformations d'usage des sols.

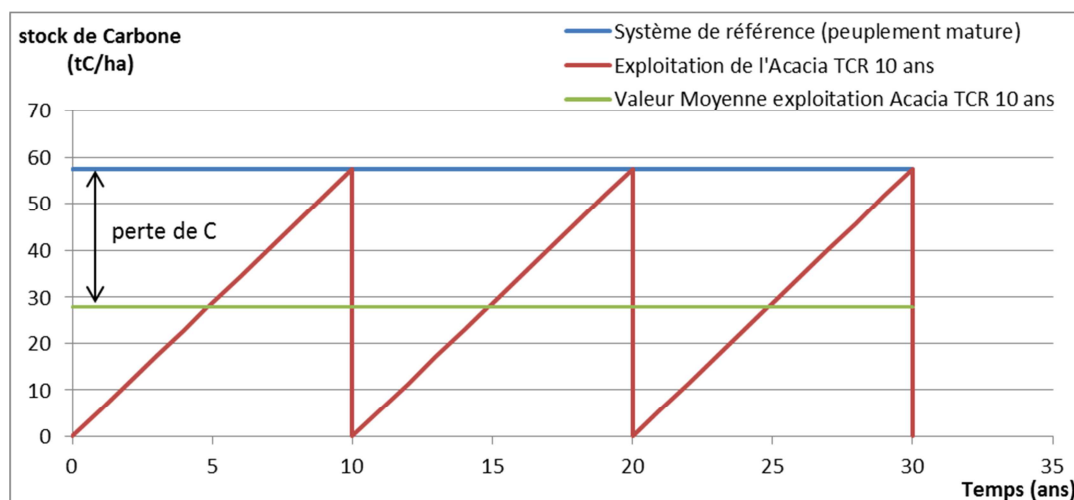


FIGURE 23 : VARIATION DES STOCK DE CARBONE POUR LES PEUPLEMENTS D'ACACIA MATURES ET EXPLOITES

3.4.2.1.1.2. Bois palette

Dans le système de référence, les capacités de stockage des palettes déclassées sont saturées et les surplus sont régulièrement brûlés. Le scénario étudié comptabilise donc les émissions évitées liées à l'absence de combustion des palettes. Les émissions liées à la combustion de bois sont issues de données de la littérature et correspondent aux facteurs d'émission pour les foyers ouverts (INERIS et al. 2008) (voir Tableau 21). Les émissions de SO₂ sont calculées en fonction de la teneur en S de la biomasse brute en considérant que 100% du S se retrouve dans les fumées. La teneur en S du bois de palette est de 0,03% MS (Phyllis).

TABLEAU 21 : FACTEURS D'EMISSION EN FOYER OUVERT (INERIS ET AL. 2008)

Composés	Facteur d'émission en foyer ouvert (CITEPA 2009)
NO _x (g/GJ)	60
COVNM (g eq C ₃ H ₈ /GJ)	1700
CO (g/GJ)	7000
polychlorodibenzo- <i>p</i> -dioxines PCDD-F (ng iTEQ/GJ)	100
benzo(a)pyrène (BaP)(mg/GJ)	24,2
benzo(b)fluoranthène (BbF) (mg/GJ)	27,1
benzo(k)fluoranthène (BkF) (mg/GJ)	16,6
indéno(1,2,3-cd)pyrène (IndPy) (mg/GJ)	14,1
benzo(g,h,i)pérylène (BghiPe) (mg/GJ)	7,2
Benzo(a)anthracène (BaA) (mg/GJ)	40,9
fluoranthène (FluorA) (mg/GJ)	153,9
Particules en suspension < 10 µm (PM10) g/GJ	15
Particules en suspension < 2,5 µm (PM2,5) g/GJ	697,5

Les cendres de la combustion restent au sol et ne sont pas traitées dans un centre de traitement des déchets (enfouissement). La composition des cendres de bois de palette n'étant pas connue, nous avons

retenue celle du bois de peuplier sans écorces (base de données Phyllis), principal composant des palettes européennes (voir Tableau 23).

3.4.2.1.1.3. Paille de canne

Le système de référence prend en compte les besoins des élevages bovins. Le scénario de gazéification se base donc sur des prélèvements de paille effectués sur de nouvelles parcelles de canne mécanisables. Les impacts comptabilisés prennent en compte la diminution de résidus de paille sur les parcelles (de 100% à 33,3%). L'exportation des pailles de canne a pour impact principal la diminution des stocks de carbone dans le sol. Dans la littérature la différence de stockage de carbone a été évaluée sur les systèmes de culture de canne à sucre entre un brûlis des feuilles de cannes avant récolte (couramment pratiqué en dehors de la Réunion où cette pratique est interdite) et le retour des pailles au sol après récolte. Nous nous référerons aux données fournies par Cerri et al (2011) concernant des sols sableux au Brésil, comparables à la texture des sols de la Réunion et dont les dynamiques de stockage de carbone des résidus de canne sont significativement différentes des sols argileux. La valeur moyenne fournie dans cette étude est de 3,08 tC/ha ; nous considérerons que cette valeur correspond à la phase de stabilisation de stockage du carbone suite au changement de pratique agricole. En reprenant les données de l'INRA (INRA 2002, 131), effectuée en France métropolitaine sur la gestion des résidus de blé, nous considérerons que le rapport entre la différence de stock de carbone entre les pailles exportées et les pailles brûlées est constant, soit 2/3. Dans cette étude, la perte de carbone suite à l'exportation des pailles est donc de 1,38tC/ha. La norme IPCC permet de convertir le carbone émis en CO₂ en considérant un horizon temporel de 20 ans, ce qui porte les émissions à 0,25 tCO₂/ha/an.

3.4.2.1.2. Les émissions agricoles

Les modèles utilisés par ecoinvent et Simapro n'intègrent pas les émissions agricoles, c'est-à-dire le devenir des différentes substances présentes dans les engrais minéraux ou organiques qui se dégradent ou se recombinaient dans l'eau, l'air ou le sol. Selon les scénarios, ces dernières ont donc été calculées à partir des données fournies par Agribalyse (Koch et Salou 2015) et l'IPCC (IPCC 2006) pour les émissions :

- dans l'air : ammoniac (NH₃), protoxyde d'azote (N₂O), monoxyde d'azote (NO)
- dans l'eau : nitrate (NO₃⁻ et P),
- dans le sol des éléments traces métalliques (ETM) (voir Annexe 10).

Pour l'*Acacia mearnsii*, l'exploitation forestière ne comporte pas d'émissions agricoles (pas d'engrais, pas de produits phytosanitaires). Les émissions agricoles sont donc uniquement liées à l'épandage des cendres de gazéification qui peuvent contenir des ETM (éléments traces métalliques : cadmium, cuivre, zinc, plomb, nickel, chrome et mercure). Or, l'épandage s'effectuera probablement sur des parcelles agricoles à proximité de la plateforme de gazéification, et non sur les coupes forestières, trop éloignées et peu accessibles pour un épandage mécanique. Les émissions agricoles liées à l'épandage des cendres correspondent donc à un transfert des ETM contenus dans le sol et captés par les peuplements d'*Acacia* durant leur croissance, vers les parcelles agricoles. A noter qu'il est considéré que 100 % des ETM de la biomasse brute se retrouvent dans les cendres de gazéification (voir Tableau 22). Il sera donc comptabilisé à la fois une captation d'ETM et un apport d'ETM au sol, de même valeur mais localisés dans des zones différentes.

Le bois de palette présente un cas différent puisque le cycle de vie de la palette débute lors du déclassement de la palette. Les émissions liées à la production forestière du bois de palette ne sont donc pas comptabilisées. Les émissions d'ETM liées à l'épandage des cendres sur des parcelles agricoles sont donc comptabilisées dans leur totalité.

La paille de canne présente une troisième situation. D'après l'IPCC (IPCC 2006 chap 11), lorsque les intrants de matières organiques ou minérales sont égaux aux exportations, les émissions s'équilibrent, elles ne sont donc pas comptabilisées. L'épandage des cendres s'effectuera sur les parcelles sur lesquelles la canne est produite. L'épandage des cendres correspond à un apport d'éléments minéraux et d'ETM égaux aux exportations des pailles de canne. Les émissions relatives aux ETM ne sont donc pas comptabilisées lors de l'opération d'épandage des cendres de canne de paille.

Par ailleurs, d'après le système étudié, les conséquences de l'exploitation de la paille de canne intègrent un changement de pratique agricole qui consiste à exporter 2/3 de pailles de canne plutôt que de laisser 100% des pailles au sol. Or, le paillis est responsable de l'émission de substances liées à la dégradation de l'azote contenu dans le résidu agricole (protoxyde d'azote (N_2O), monoxyde d'azote (NO) ou nitrates (NO_3^-)). Il sera donc comptabilisé la différence d'émission entre le paillis avec 100% des pailles (appelé « scénario de référence ») et l'exportation de 2/3 des pailles (appelé « exportation des pailles »). Les émissions sont calculées à partir des modèles proposés par Agribalyse (Koch et Salou 2015) en cohérence avec les modèles du GIEC. Pour des raisons de simplification, seule la différence de quantité de paille exportée sera considérée dans le calcul, soit une différence de 10 t MS de paille. Pour le « scénario de référence », la quantité d'apport azoté permis par les 10 t MS de paille contenant 0,4 % d'azote est de 40 kgN/ha (Energy research Centre of the Netherlands 2012 fiches #2114 et #2277).

Pour le scénario « exportation des pailles » ; il est à noter que le GIEC considère qu'un changement de pratique agricole peut conduire à une perte de carbone dans les sols et ainsi déséquilibrer le rapport C/N qui tendra à revenir à une valeur stabilisée par la libération de N dans le sol (IPCC 2006 chap 11). Ainsi, l'exportation des pailles de canne correspond à un déstockage de carbone dont l'une des conséquences est la libération d'azote, dont une partie sera émise sous forme de N_2O dans l'air. En s'appuyant sur les calculs précédents, la perte de carbone est de 0,069 tC/ha/an pendant 20 ans, ce qui correspond à une libération de 6,9 kgN/ha/an à partir d'une valeur d'équilibre moyen de C/N de 10 proposé par l'IPCC. Les émissions de monoxyde d'azote (NO) et de nitrate (NO_3^-) sont comptabilisées en fonction des valeurs de référence proposées par Agribalyse. Les émissions d'ammoniac (NH_3) ne sont pas comptabilisées car les scénarios étudiés n'intègrent pas l'apport de fertilisant minéral ou organique, ce qui est différent de l'apport de résidus agricoles. Les émissions de phosphore ne sont pas comptabilisées car selon Agribalyse (méthode Salca-P), le modèle d'émission du P lessivé et ruisselé ne dépend pas des apports des résidus agricoles ; les émissions de P entre le « scénario de référence » et le scénario « exportation des pailles » se compensent.

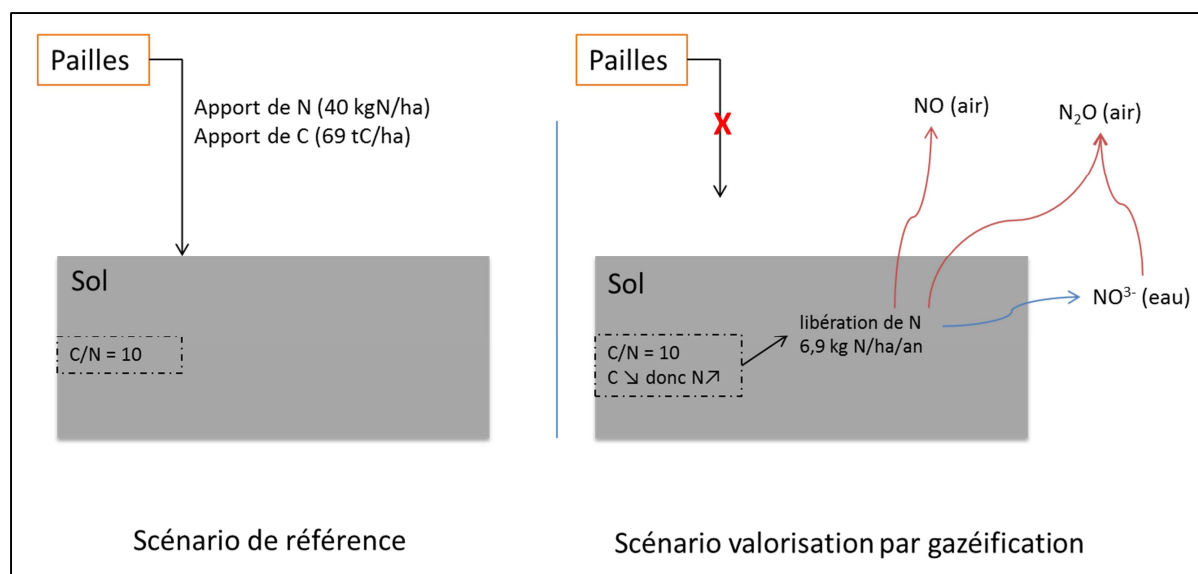


FIGURE 24 : EMISSION AGRICOLES COMPTABILISEES SUITE A L'EXPORTATION DES PAILLES DE CANNE A SUCRE

Les autres émissions agricoles (liées aux apports d'engrais minéraux, organiques ou produits phytosanitaires) ne sont pas comptabilisées dans les scénarios car elles ne correspondent pas aux conséquences étudiées de l'exploitation de la biomasse.

3.4.2.1.1. La mobilisation de la biomasse

3.4.2.1.1.1. *Acacia mearnsii*

A partir des itinéraires techniques décrits par les personnes ressources de l'ACCC, les émissions liées aux opérations d'abattage et de débardage du bois sont comptabilisées. Il est comptabilisé l'utilisation de deux tronçonneuses pour produire 4,5 stères pendant 1 journée de travail (6h), soit 1,627 h de tronçonneuse par tonne d'*Acacia* abattu et mis en stère. La consommation de carburant (essence pour moteur 2 temps) est de 3 l/j/tronçonneuse. Le bois abattu est amené en bord de route forestière à l'aide d'un treuil fixé sur un tractopelle avec godet. Le processus utilisé est proche du câble-mât, proposé dans la base de données ecoinvent, avec 1,33 h pour 1t de bois transporté bord de route. La consommation de carburant (diesel) est de 5,4 l/h. Enfin, le transport est réalisé par un camion de 19t. La distance de transport est fixée à 15 km, correspondant à la distance entre la plateforme de l'ACCC et le CFPPA et la capacité de transport est calculée en fonction d'un coefficient de foisonnement²⁷ de 0,4 (comm.personnelle Copobois 2015).

3.4.2.1.2.1. Bois palette

Le système débute à partir de la fin de vie de la palette, aucun impact n'est donc comptabilisé concernant les étapes précédentes (exploitation du bois, construction des palettes, vie de la palette en tant que support logistique, etc.). Le transport est effectué par camion, sur une distance de 30 km, correspondant à la distance moyenne entre les deux sociétés de traitement des bois palette identifiées et le CFPPA.

3.4.2.1.2.2. Pailles de canne à sucre

Les pailles de canne à sucre sont fanées, mises en balle, chargées sur des remorques et transportées en tracteur. La densité des balles de paille considérée est de 130 kg/m³ (données Chambre d'Agriculture de la Meuse 2010 pour des balle de paille ronde). La distance de transport est très courte (1 km) puisque l'on

²⁷ Voir glossaire

considère que les pailles seront exportées depuis les parcelles du CFPPA. Les processus utilisés proviennent de la base de données ecoinvent, avec suppression de l'enrubannage pour les bottes de pailles.

3.4.2.1.3. Le stockage de la biomasse

La biomasse brute est stockée sur une aire de stockage composée d'une dalle bétonnée et surmontée d'un abri (toit en tôles, charpente en bois, soutenu par des poteaux en béton armé). La surface de stockage pour chaque scénario est calculée en Annexe 3, selon la masse volumique, l'encombrement de la biomasse stockée sous forme compressée ou non (botte de paille ou stère de bois), ainsi que la régularité de l'approvisionnement. Pour la paille de canne, transformée en granulés, l'espace occupé par un silo de stockage est également comptabilisé.

3.4.2.1.4. Le broyage ou la granulation de la biomasse

Le broyage est effectué à l'aide d'un broyeur forestier. Le processus utilisé correspond au broyage de plaquettes forestières d'une capacité de 2,2t/h. Les quantités de matériaux utilisés pour la construction de l'équipement sont supposées identiques (par tonne broyée) au broyeur ciblé selon les spécificités du cahier des charges d'une capacité d'environ 0,5 t/h. La granulation est réalisée à l'aide d'un pelletiseur constitué d'un broyeur, d'un mélangeur et d'une presse. Le processus utilisé se base sur un pelletiseur d'une capacité de 1250 kg/h. De la même manière que pour le broyeur, les quantités de matériaux utilisés sont supposées identiques au pelletiseur ciblé, d'une capacité estimée à 125 kg/h.

La consommation électrique du broyeur ou du pelettiseur sont également prise en compte en fonction de la puissance estimée de l'équipement (voir Annexe 2) et de la capacité de broyage ou de granulation.

3.4.2.1.5. Le séchage de la biomasse

La modélisation du séchoir solaire a été simplifiée en absence de données techniques sur le type d'équipement sélectionné. Le séchage est réalisé à l'aide d'un séchoir solaire, composé d'une plaque de chauffage thermique permettant de chauffer un volume d'air collecté dans un caisson et conduit dans une benne de séchage de la biomasse. La modélisation de la plaque thermique est issue du processus de la base de données ecoinvent. Le caisson est constitué de plaques d'aluminium d'une épaisseur de 5mm, fermé sur 3 côtés. Les raccordements entre les bennes et le caisson ont été négligés, ainsi que le ventilateur pour faciliter la circulation de l'air chaud. La dimension du module solaire respecte les mentions du cahier des charges (surface du module solaire 6*12m, 2 bennes de dimensions 4*7*3m).

3.4.2.1.6. La gazéification

Cette étape consiste à convertir la biomasse en syngaz. La modélisation du gazéifieur est basée sur des travaux réalisés par le CIRAD (Jan 2012). Le gazéifieur est composé d'un socle en ciment (83 kg) et d'acier (166 kg). La modélisation prend en compte le façonnage de l'acier, ainsi que l'équipement d'un système de ventilation. La durée de vie du gazogène est de 30 ans. Le rendement énergétique attendu, et qui sera considéré comme valeur référence est de 70% (conversion de l'énergie calorifique de la biomasse en syngaz).

Après gazéification, les différents éléments minéraux et organiques constituant la biomasse se retrouvent dans trois produits ou sous-produits du processus : le syngaz, les cendres et les condensats. En absence de mesures réalisées sur les biomasses testées et sur l'équipement prévu, le devenir des matières minérales et organiques de la biomasse après gazéification a été raisonné selon les hypothèses suivantes, à partir de la littérature, d'avis d'experts et des hypothèses formulées dans des évaluations similaires (projet BioViVe), corrigées par des travaux de la littérature pour des procédés similaires pour le bilan azoté (Leppälahti et Koljonen 1995).

TABLEAU 22 : REPARTITION DES ELEMENTS MINERAUX ET ORGANIQUES DANS LES DIFFERENTS PRODUITS ET SOUS-PRODUITS DE LA GAZEIFICATION

		Syngaz	Condensats	Cendres
Eléments minéraux	Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si ; As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, Tl, V, Zn			100 %
	S	20 %		80 %
	Cl		100%	
Eléments organiques	N (d'après Leppälahti et Koljonen 1995)	N ₂ : 67%	N-orga : 16% N-solide : 13% NH ₃ : 4 %	

La composition des biomasses provient de la base de données Phyllis2 (Energy research Centre of the Netherlands 2012). Les biomasses ligneuses sont principalement composées de carbone (entre 40 et 50%), d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) (voir Figure 25 ci-dessous).

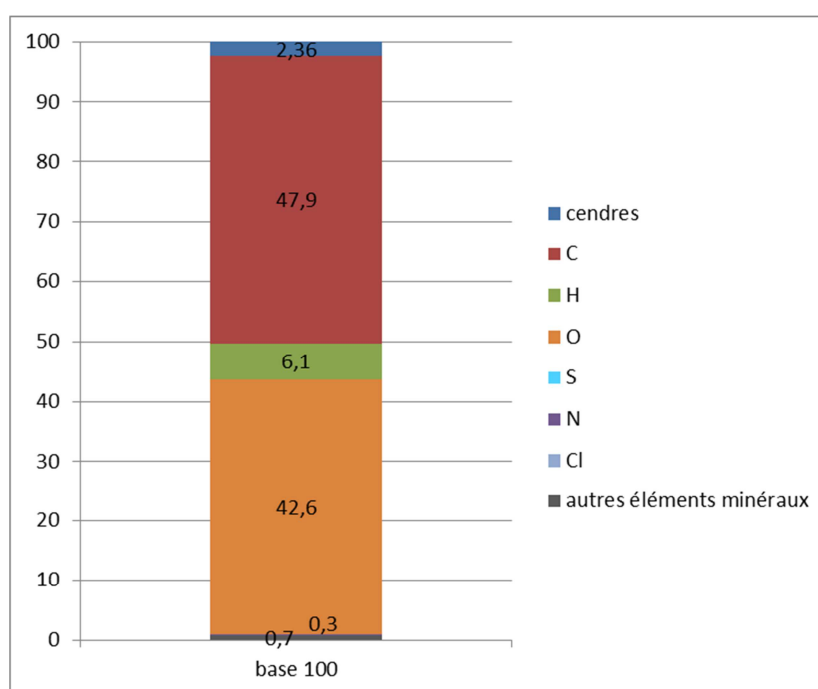


FIGURE 25 : COMPOSITION DU BOIS D'ACACIA (MS)

La composition des cendres est déduite de la composition brute selon la répartition présentée ci-dessus (Tableau 22), ou bien d'analyses spécifiques sur les cendres fournies par Phyllis lorsque les données ne sont pas directement disponibles pour les matières brutes (pailles de canne par exemple)(voir Annexe 9 pour la composition détaillée).

TABLEAU 23: PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA COMPOSITION DE LA MATIERE SECHE ET DES CENDRES DE L'ACACIA, DU BOIS DE PALETTE ET DE LA PAILLE DE CANNE (DONNEES PHYLLIS)

composition de la biomasse (%MS)			
	Bois d'Acacia	Bois de Palette	Paille canne
Unité	% MS	% MS	% MS
taux de cendre	2,36	1,62	9,6
C	47,94	50,46	41,8
H	6,10	1,13	5,4
N	0,26	0,35	0,4
S	0,02	0,03	0,063
O	42,55	45,98	42,4
composition cendres pour 1kg de cendres			
Unité	kg/kg cendre	kg/kg cendre	kg/kg cendre
C	0,1	0,1	0,1
S	0,00015	0,000250	0,00050438
Al	0,01378	0,00653	0
K	0,05015	0,12336	0,14295159
Na	0,01345	0,00134	0,0011871
Ca	0,0959	0,33710	0,04460321
Si	0,067304	0,01866	0,31760948
Mg	0,01689	0,06850	0,01941588
Fe	0,017021	0,00692	0,00776165
P	0,022	0,00327	0,01104648

3.4.2.1.7. Le traitement des gaz

Le traitement des gaz est composé de deux étapes : le refroidissement du syngaz par un groupe froid et le lavage du syngaz avant la combustion dans le moteur. Pour le refroidissement du gaz, la consommation électrique du groupe froid a été comptabilisée en fonction de la puissance estimée de l'équipement, de son taux de charge et de sa durée de fonctionnement. La consommation électrique du groupe froid représente ainsi 25% de la production finale d'électricité (Annexe 2).

Le lavage du gaz permet la capture de goudrons et la condensation de l'eau résiduelle du syngaz. La consommation d'eau est calculée en fonction du débit d'eau du circuit de refroidissement, estimée à 50 l/h à partir de données de procédés similaires (Jan 2012). Pour les équipements attendus, l'eau de refroidissement est généralement utilisée en circuit fermé mais doit être renouvelée régulièrement. Les condensats de gazéification et l'eau de refroidissement sont considérés comme des effluents et supposés être évacués dans le réseau d'assainissement qui aboutit en station d'épuration. Le traitement des condensats est donc basé la concentration de substances polluantes des condensats en STEP. Le calcul des émissions est effectué à partir d'un outil de calcul ecoinvent (*Calculation Tool for Municipal Wastewater Treatment Plant WWTP*, ecoinvent v2.1 2008, Gabor Doka 2002) en fonction de la concentration en carbone et en azote de l'effluent. Pour le carbone, la concentration est calculée à partir de la composition des condensats dans les eaux de lavage, issue de mesures effectuées au CIRAD (Jan 2012). Pour l'azote, la concentration est calculée à partir du devenir des éléments organiques (Tableau 22), où 33 % de l'azote de la biomasse brute se retrouve dans les condensats, sous forme d'ammoniac, d'azote organique soluble ou solide. La teneur en azote des biomasses brutes est issue de la base de donnée Phyllis (Energy research Centre of the Netherlands 2012).

3.4.2.1.8. La combustion dans le moteur à gaz

La production d'électricité à partir du syngaz (produit à l'étape de gazéification) est assurée par un moteur à gaz. Le processus utilisé correspond à la combustion de gaz naturel dans un moteur à gaz de 206 kW, issu de la base de données ecoinvent (matériaux utilisés, process de fabrication de l'équipement et

émissions de substances lors de la combustion de gaz). Les émissions de la combustion de gaz naturel ont été modifiées de façon à correspondre à la composition du syngaz (suppression des émissions de mercure et modification des émissions de SO₂ afin de correspondre à 20 % des apports initiaux en S de la biomasse). Le rendement du moteur est de 28,6%.

3.4.2.1.9. L'évacuation des cendres par épandage au champ

Le système étudié intègre la possibilité de collecte et l'épandage des cendres au champ. Les cendres sont considérées comme des éléments fertilisants et facilement assimilables. L'intérêt de l'apport de cendres dépend de la composition physico-chimique des sols sur lesquelles elles sont épandues. Elles présentent un intérêt pour les sols acides ou carencés en Ca, Mg, K (ADEME 2014). Elles permettent également de bloquer l'aluminium libre présent dans les sols trop acide (pH < 5) et améliorent la rétention d'eau par l'apport d'éléments de faible granulométrie (Fillols et Chabalier 2007). L'apport de cendres (de bagasse) conseillé sur les champs de canne à sucre réunionnais est de 50t/ha de cendres sèches à la plantation (Fillols et Chabalier 2007).

Il est supposé que l'épandage soit réalisé sur les champs de canne du CFPPA, sous réserve d'analyser l'intérêt agronomique de l'apport de cendres. Pour des raisons de coût lié à la logistique (temps, distance de transport, multiplicité des parcelles), l'épandage forestier qui permettrait la restitution d'éléments minéraux est exclu. A noter que l'épandage des cendres de chaudière ou de gazéification est conditionné par l'établissement d'un plan d'épandage validé par arrêté préfectoral (voir Annexe 4).

La modélisation de cette étape se base sur un processus proposé par ecoinvent, comprenant un épandeur spécifique pour produits pulvérulents ainsi que les émissions au champ (métaux lourds). En absence de données spécifiques permettant de les modéliser, les mécanismes de dégradation et de passage dans l'eau ou dans l'air d'une partie des substances émises ne sont pas comptabilisés. Les émissions sont donc attribuées à 100% au compartiment sol. Selon les biomasses étudiées, la teneur en matière minérale est de 1,7 (biomasse bois) à 4,5 g/kg (biomasse paille de canne) de biomasse brute entrante (voir composition des cendres en Tableau 23 et Annexe 9). Ces données devront être consolidées par des mesures directes d'échantillon de biomasses.

3.4.2.1.10. La consommation électrique des auxiliaires

La consommation électrique des auxiliaires est calculée à partir des estimations fournies par Bee&Co et revues par Van de Steene (comm. personnelle 2015). En excluant l'énergie de broyage et celle du groupe froid, la consommation électrique s'élève à 27 et 25% de la production finale d'électricité par gazéification, respectivement pour le traitement de l'Acacia, des palettes, et pour celui de la paille de canne. Le mix électrique a été modélisé à partir des procédés ecoinvent, en respectant la composition du mix électrique réunionnais (OER 2015) (tableau suivant). Conformément aux informations communiquées par le fournisseur de réseau, une perte en ligne sur le réseau électrique de 10,1% a été comptabilisée (EDF 2013).

TABLEAU 24 : COMPOSITION DU MIX ELECTRIQUE A LA REUNION EN 2014 (OER 2015)

Sources de production d'électricité	Part du mix électrique en 2014 (%)
Charbon	42
Fioul	25
Hydraulique	15
Bagasse	9
Photovoltaïque*	9

*La part de photovoltaïque a été arrondie à 9%. A noter que le biogaz et l'éolien comptent pour moins de 1% de la production électrique.

3.4.2.1.11. Les infrastructures

Les spécificités du hangar abritant la plateforme du CFPPA se conforment aux cahiers des charges : une surface de 13*7 m soit 133 m², fermé sur deux côtés les plus exposés aux vents. A nouveau la modélisation réalisée par Jan (2012) a été la base des calculs. Le hangar est composé d'une dalle de béton, 6 poteaux en acier renforcé, une charpente en bois et une couverture en tôles, auxquels ont été ajoutés deux murs de béton sur la longueur du bâtiment.

3.4.2.1.12. Transport de l'équipement

Le transport maritime depuis l'Europe (France) jusqu'à la Réunion (9726 km maritimes) puis le transport routier du Port jusqu'au CFPPA (30km) ont été pris en compte pour les équipements importés de la plateforme : broyeur, séchoir et gazéifieur.

3.4.2.2. Scénarios Acacia et palettes à l'échelle régionale

Les activités du système sont modélisées de la même manière que pour les scénarios du CFPPA. Certains paramètres ont été modifiés afin de correspondre aux caractéristiques des scénarios :

- Distances de transport de la biomasse (respectivement 2 et 3 km pour les scénarios Palette et Acacia) ;
- La puissance installée (100 kWé pour le scénario Acacia, 500kWé pour le scénario Palette) et la durée de fonctionnement de l'unité (6000h/an) ;
- La consommation électrique des auxiliaires : 19%.

Certains paramètres ont été supposés proportionnels à la puissance installée :

- Le débit d'eau de lavage du syngaz (50l/h pour une puissance installée de 30 kWé).

D'autres paramètres sont supposés inchangés :

- Les impacts du broyage de la biomasse, constants par tonne broyée ;
- Les rendements énergétiques du gazogène et du moteur.

Les infrastructures sont les suivantes :

- Hangar de 200 m², d'une durée de vie de 30 ans, et modélisé de façon identique aux hangars des scénarios CFPPA.
- Une aire de séchage de 257m² pour l'Acacia et 196m² pour le bois palette, modélisée de façon identique aux scénarios CFPPA.
- Une unité de séchage par co-génération, basée sur le modèle du séchoir solaire, auquel a été enlevée la plaque de solaire thermique. Les raccordements et ventilateurs n'ont pas été pris en compte.

3.4.2.3. Scénarios Canne fibre, CFPPA

Pour la canne fibre, le système est défini de façon à intégrer l'ensemble des activités du cycle de vie, y compris les activités relatives à l'itinéraire technique sur la parcelle.

3.4.2.3.1. Itinéraire technique

L'établissement d'un itinéraire technique adapté à la canne fibre est actuellement l'objet de recherches menées au CIRAD (projet SYPECAR). En absence de données consolidées, l'itinéraire choisi sera celui de la canne à sucre, dans les tâches culturales y compris la fertilisation et les traitements phytosanitaires. La fertilisation correspond aux préconisations fournies par le CIRAD et le CTICS pour une parcelle sans problème de fertilité (Fillols et Chabaliér 2007) et avec un haut niveau de rendement (140 t/ha) : soit 143, 79 et 238 kg/ha respectivement pour les apports en N, P₂O₅ et K₂O. La proportion des différentes formes d'engrais est basée sur le modèle de la canne à sucre brésilienne (ecoinvent) à partir des engrais disponibles à la Réunion (Fillols et Chabaliér 2007) et pour lesquels les doses de N,P,K ont été ventilées.

Les traitements phytosanitaires se conforment aux recommandations du plan EcoPhyto qui vise à réduire l'usage des produits phytosanitaires²⁸ (voir Annexe 12).

TABLEAU 25: TRAITEMENTS PHYTOSANITAIRES APPORTES A LA CANNE FIBRE

époque	Produit	Unité	DOSE CONSEILLÉE Ecophyto (Unité /ha/an)	Matière active 1	g MA/unité	qté gMA/ha	Matière active 2	g/unité	qté gMA/ha
pré+post	Camix	L	3,75	S-métolachlore	400	1500	Mésotrione	40	150
pré	Merlin	kg	0,1	Isoxaflutole	750	75			
pré	Mercantor Gold	L	0,5	S-métolachlore	960	480			
pré	Prowl 400	L	1,5	Pendiméthaline	400	600			
pré	Sencoral UD	kg	0,625	Métribuzine	700	437,5			
post précoce	Callisto	L	1	Mésotrione	100	100			
post	Dicopur 600	L	2	2,4 D	600	1200			
post	Starane 200	L	1	Fluroxypyr	200	200			

Source : Sypecar 2015, Ecophyto (Plaquette réduction de dose), + <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>

3.4.2.3.2. Transformation, gazéification

Les étapes du cycle de vie suivant la récolte et le transport de la biomasse sont identiques à celles du scénario « Paille de canne » pour le CFPPA : granulation de la biomasse, séchage solaire, gazéification et production d'électricité. Les hypothèses concernant l'espace de stockage de la biomasse brute et des granulés sont identiques (Annexe 3).

3.4.2.3.3. Epandage des cendres

Les cendres de gazéification sont ensuite épandues sur les champs de canne fibre. La composition des cendres de canne fibre étant inconnue pour l'heure, les données sont issues des cendres de bagasse après combustion dans les centrales thermiques de l'île (Fillols et Chabalière 2007) (Annexe 12). Leur forte teneur en phosphore et potassium permet de réduire les apports de fertilisants minéraux afin de ne pas dépasser les doses recommandées par Fillols et Chabalière (2007). Ainsi les cendres de gazéification épandues sur la surface de canne fibre cultivée à cet effet (1,1 ha) apportent respectivement 33 et 48 kg/ha de P₂O₅ et de K₂O.

3.4.2.3.4. Modèles d'émissions agricoles

Comme pour les scénarios Acacia, bois de palette et pailles de canne, les émissions agricoles sont calculées à partir des modèles fournis par Agribalyse (Koch et Salou 2015) pour les émissions suivantes :

- dans l'air : ammoniac (NH₃), protoxyde d'azote (N₂O), monoxyde d'azote (NO)
- dans l'eau : nitrate (NO³⁻), phosphate (PO⁴⁻)
- dans le sol : éléments traces métalliques (ETM) et produits phytosanitaires, (voir Annexe 10 et Annexe 12).

Les émissions dans l'air et l'eau sont calculées en fonction de la composition des engrais minéraux en azote et phosphate et des données de référence du rapport Agribalyse pour les cultures tropicales.

Pour les émissions d'ETM, le modèle proposé par Agribalyse a été adapté en cohérence avec le système étudié et les recommandations de l'IPCC (IPCC 2006). Ce modèle se base sur le bilan massique entre les intrants de différents ETM (Cd, Cu, Cr, Zn, Ni, Pb, Hg) et les sorties d'ETM par exportation de biomasse,

²⁸ Objectif de réduction de 50 % l'usage des produits phytosanitaires d'ici 2018.

lixiviation ou ruissellement auxquelles sont affectées une allocation en fonction de la déposition atmosphérique des ETM. D'après l'IPCC, les sorties d'ETM par exportation de la biomasse ne sont pas comptabilisées, puisqu'elles sont compensées par ailleurs avec l'épandage des cendres. Les sorties d'ETM liées à la lixiviation ne sont pas comptabilisées car elles sont déjà incluses dans le modèle USETOX intégré dans la méthode ILCD utilisées pour le calcul des émissions. Enfin, les sorties d'ETM liées au ruissellement n'ont pas été prises en compte étant donné la forte incertitude sur les paramètres du modèle, dont les dépositions atmosphériques d'ETM qui sont fortement localisées. Au final, seuls les intrants d'ETM sont pris en compte, liés aux apports d'engrais minéraux et pour lesquels les données Agribalyses, comme la teneur en ETM pour chaque type d'engrais.

3.4.3. Interprétation des résultats de l'ACV

3.4.3.1. Interprétation des scénarios CFPPA ; l'analyse de contributions

Les impacts de chaque scénario seront tout d'abord analysés à partir des contributions des étapes successives du cycle de vie pour chacun des scénarios. Un diagramme de contribution est construit et représente la part de chaque étape dans l'impact environnemental, ramené à une base 100. Certaines étapes ont un impact négatif, ce qui signifie qu'elles représentent des impacts évités.

3.4.3.1.1. Scénario « Acacia » CFPPA

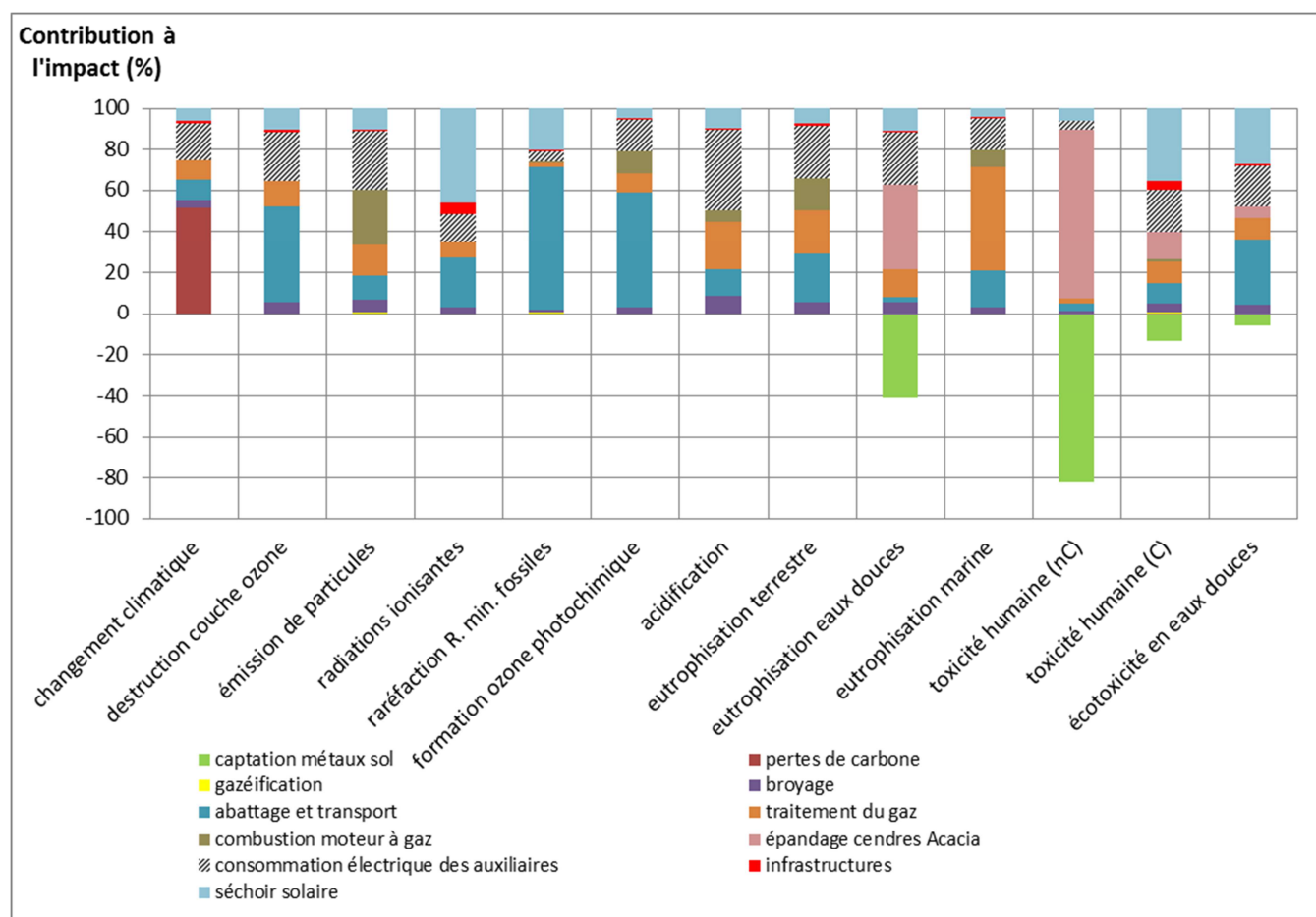


FIGURE 26 : DIAGRAMME DE CONTRIBUTION AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR LE SCENARIO "ACACIA CFPPA" (METHODE ILCD 2011, MIDPOINT)

3.4.3.1.1.1. Effets sur le changement climatique

Les effets sur le changement climatique sont mesurés à partir d'un indicateur composé des émissions de gaz à effet de serre, convertis en émission de CO₂ équivalent (kg CO₂q eq).

Les émissions de GES du scénario Acacia CFPPA sont provoquées à plus de la moitié par les pertes de carbone suite à l'abattage des arbres (51%) ; puis à 17,6% par la consommation électrique des auxiliaires de la plateforme de gazéification et enfin à environ 10% chacun pour l'abattage des arbres et le traitement du gaz.

La consommation électrique de la plateforme représente une part importante des émissions de GES du scénario puisque les émissions liées au traitement du gaz sont à 95 % le fait de la consommation électrique du groupe froid du moteur nécessaire au refroidissement du syngaz avant combustion dans le moteur. En ajoutant la consommation électrique liée au broyage de la biomasse ; la consommation électrique totale de la plateforme représente 30,6% des émissions de CO₂eq. L'impact de la consommation électrique s'explique à 75% par les émissions liées à la production d'électricité à partir de charbon et à 23% à partir de fioul.

L'essentiel des émissions de GES est dû à des émissions de CO₂ (97%) et 3% seulement à des émissions de méthane.

3.4.3.1.1.2. Destruction de la couche d'ozone

La destruction de la couche d'ozone est principalement causée par l'étape d'abattage des arbres (46,6%), puis par la consommation électrique des auxiliaires (23,5%), le traitement du syngaz (12,9%) et le séchoir solaire. L'essentiel de ces émissions de CFC est lié à l'utilisation de pétrole (plus de 80%), où un produit est responsable à 99% des émissions de CFC. Il s'agit du halon 1301, utilisé sur les plateformes offshore pour limiter le risque d'incendie. Cet indicateur est donc principalement lié à l'utilisation de pétrole (diesel, mélange moteur deux-temps) que l'on retrouve dans l'utilisation de l'équipement forestier (tracteurs, scies) et dans le mix électrique (87% de l'impact de l'électricité produite à partir de fioul).

3.4.3.1.1.3. Emissions de particules

L'émission de particules est principalement causée, à parts sensiblement égales, par deux étapes du cycle de vie : la combustion du syngaz dans le moteur (26%) et la consommation électrique des auxiliaires (28%). Puis, avec une contribution moins élevée par le traitement des gaz (16,6%), l'abattage des arbres (12%) et le séchoir solaire (10,4%). Les émissions liées à l'étape de traitement des gaz sont essentiellement dues à la consommation électrique du groupe froid et de la station de traitement des eaux usées.

3.4.3.1.1.4. Effet des radiations ionisantes sur la santé humaine

Les radiations ionisantes sont principalement émises par l'étape de séchage solaire (46 %). Le fort impact du séchage s'explique par les process de fabrication de l'aluminium des bacs de séchage en Europe, notamment à partir d'énergie nucléaire, responsable de l'émission de radon 22 dans l'air (68% des émissions ionisantes des bacs de séchage). L'abattage des arbres arrive en seconde position avec 25% des émissions de radiations ionisantes, liées à la consommation électrique lors de la transformation du pétrole pour produire les carburants utilisés pour l'abattage (diesel et mélange deux temps).

3.4.3.1.1.5. Epuisement des ressources minérales et fossiles

L'épuisement des ressources minérales et fossiles est principalement représenté par l'épuisement des ressources minérales, puisque moins de 1% de l'impact est lié à l'épuisement des ressources fossiles. Les étapes qui contribuent le plus à l'impact sont : l'étape d'abattage (69 %) et de façon plus faible par le séchage solaire (20%). L'abattage des arbres utilise des matériaux minéraux, tels que le zinc (70% de la

consommation de ressources de l'abattage et du transport du bois) utilisé dans les treuils pour le débardage des bois en forêt. Les minéraux utilisés dans le séchoir solaire se trouvent principalement dans la plaque de solaire thermique, avec du zinc, de l'étain et du nickel.

3.4.3.1.1.6. Formation d'ozone photochimique

La formation d'ozone photochimique est causée à 50% par l'étape d'abattage et de transport des arbres, puis à 15% par la consommation électrique des auxiliaires. Les émissions de l'abattage des arbres sont liées à l'utilisation de tronçonneuses qui émettent des COVNM. D'autres étapes participent à la formation d'ozone photochimique par l'émission de NOx ; parmi les principales : la production d'électricité à partir de charbon (20%) et la combustion du syngaz dans le moteur (11%).

3.4.3.1.1.7. Acidification

L'acidification est principalement causée par la consommation électrique des auxiliaires (38%), le traitement du gaz (25%), puis par l'abattage (13%), le séchage solaire (9%) et le broyage (8%). L'acidification est liée aux émissions de dioxyde de soufre à 65% (produites pour moitié par la production d'électricité à partir de charbon) et de NOx (29%).

3.4.3.1.1.8. Eutrophisation terrestre

Les émissions d'azote responsables de l'eutrophisation terrestre sont émises en quantités similaires par les étapes de traitement du syngaz (25%), par la consommation électrique des auxiliaires (24%) et par l'abattage et le transport des arbres (22%). Les émissions sont plus faibles en ce qui concerne les étapes de combustion de syngaz (15%), de séchage solaire (7%) et de broyage (5%). L'eutrophisation est causée à 87 % par des émissions de NOx, issues principalement de combustion de charbon présent dans le mix électrique et de la combustion du syngaz dans le moteur.

3.4.3.1.1.9. Eutrophisation en eaux douces

L'eutrophisation en eaux douces est principalement causée par la consommation électrique de la plateforme, pour le fonctionnement des auxiliaires (44%) et par le traitement du gaz (24%). L'épandage des cendres de gazéification sur les parcelles agricoles représentent un impact important sur l'eutrophisation aquatique (69% des émissions), mais ces émissions sont totalement compensées par la captation de phosphate lors de la croissance des peuplements d'Acacia. Bien que l'impact soit considéré comme nul dans le système étudié, il est à noter qu'il se produit tout de même un transfert géographique de pollution entre les peuplements d'Acacia et les parcelles agricoles sur lesquelles les cendres sont épandues.

La forte contribution de la consommation électrique s'explique par les émissions de phosphate (PO_4^{3-}) dans les eaux souterraines des mines de charbon, notamment par ruissellement (75% des émissions de phosphate). La forte contribution du traitement du gaz sur l'eutrophisation en eaux douces s'explique également par la consommation électrique (à 99 %) et donc par l'impact des mines de charbon (à 97 %).

3.4.3.1.1.10. Eutrophisation marine

L'impact sur l'eutrophisation marine s'explique à 50% par les émissions lors du traitement des gaz, et plus particulièrement lors de la phase de traitement des eaux de lavage des condensats en STEP (à 75%). Cette étape rejette de l'ammoniac (NH_3) dans l'eau ou d'oxydes d'azote (NOx) dans l'air.

3.4.3.1.1.11. Toxicité humaine non cancérigène

De façon similaire à l'eutrophisation en eaux douces ; la toxicité humaine non cancérigène est principalement causée par la consommation électrique des auxiliaires (24%) du fait des impacts des activités extractives de charbon. L'épandage des cendres représente un impact très fort (452%) mais est totalement compensé par la captation des métaux lourds (zinc principalement et l'arsenic) lors de la

croissance des peuplements d'Acacia. La même remarque concernant le transfert de pollution s'applique ici.

En excluant les métaux, plus de 90% de l'impact est lié à l'utilisation de pesticides, issus de la production de la canne intégrée dans le mix électrique.

3.4.3.1.1.12. Toxicité humaine cancérigène

L'impact sur la toxicité humaine cancérigène est principalement causé par l'étape de séchage solaire (41%), puis par la consommation électrique des auxiliaires (24%) et par le traitement des gaz (13%). L'épandage de cendres contribue à 16% à cet impact mais, comme pour les indicateurs précédents, il est compensé à même hauteur par la captation des métaux lourds lors de la croissance des arbres. La contribution du séchage solaire s'explique par l'utilisation de matériaux dont les processus de fabrication émettent des métaux lourds cancérigènes (comme le chrome pour les bacs de séchage, l'aluminium du séchoir, le chrome des plaques solaires thermiques). La substance ayant le plus d'impact dans le système est le chrome.

En excluant les métaux, l'impact sur la toxicité humaine cancérigène est lié à 76% aux émissions de formaldéhyde issu de la combustion de carburant lors de l'étape d'abattage des arbres.

3.4.3.1.1.13. Ecotoxicité en eaux douces

L'écotoxicité en eaux douces est causée par l'étape d'abattage et de transport de la biomasse (33%), le séchage solaire (28%), la consommation électrique des auxiliaires (20,6%) et le traitement des gaz (11%). La contribution plus importante de l'abattage des arbres s'explique par l'utilisation d'acier dans le câble de treuil (émissions de cuivre). La contribution de la consommation électrique des auxiliaires et le traitement des gaz s'expliquent par les émissions relatives à l'extraction du charbon (zinc, nickel et chrome).

En excluant les métaux, l'impact sur l'écotoxicité en eaux douces est principalement lié à l'utilisation d'un herbicide utilisé pour la production d'huile lubrifiante présente dans l'équipement d'abattage.

3.4.3.1.1.14. Synthèse des impacts environnementaux du scénario Acacia CFPPA

Pour le scénario Acacia CFPPA, les étapes qui contribuent le plus aux impacts environnementaux sont celles de l'exploitation de la ressource, de l'abattage des arbres et de la consommation électrique des auxiliaires.

L'exploitation de la ressource a un impact très important sur le changement climatique, liée aux pertes de carbone par l'exploitation des peuplements forestiers. Cet impact est calculé en fonction du scénario de référence choisi, c'est-à-dire l'exploitation d'un peuplement mature d'Acacia. L'analyse de sensibilité détaillée ci-après (§3.4.3.4.1.2), montrera que le scénario de référence a une forte influence sur les émissions de GES.

L'abattage des arbres a un impact prépondérant sur la destruction de la couche d'ozone, la raréfaction des ressources minérales, la formation d'ozone photochimique. Concernant l'indicateur de destruction de la couche d'ozone, sa valeur dépend principalement de la consommation de pétrole, du fait de l'utilisation d'une substance à fort impact sur les plateformes d'extraction. Nous considérons donc que cet indicateur est peu représentatif des activités réalisées dans les scénarios étudiés.²⁹

²⁹ Pour cette raison, nous n'approfondirons pas les impacts relatifs à cet indicateur, mais les résultats resteront apparents dans la grille de comparaison au charbon et au mix électrique.

La consommation électrique des auxiliaires contribue à de nombreux indicateurs et notamment ceux d'acidification, d'émissions de particules, d'eutrophisation terrestre et d'eutrophisation en eaux douces. Pour l'ensemble de ces indicateurs, c'est l'exploitation du charbon, source d'énergie du mix électrique, qui contribue de façon conséquente à ces impacts.³⁰

L'étape de traitement des gaz contribue assez fortement à l'eutrophisation marine, du fait du traitement des condensats en STEP.

Le séchoir solaire a peu d'impacts, hormis sur les radiations ionisantes lié à l'utilisation d'énergie nucléaire principalement pour la fabrication des bacs de séchage. Nous considérerons que cet indicateur est peu pertinent pour la présente analyse, car l'utilisation d'énergie nucléaire pour la fabrication d'équipement dépend de la composition du mix électrique du pays dans lequel l'équipement est produit, ce qui est source de fortes incertitudes.³¹

Les infrastructures contribuent très faiblement aux différents impacts.

Enfin, il convient de noter que les impacts concernant la toxicité humaine et l'écotoxicité sont à considérer avec précaution du fait des incertitudes des modèles utilisés concernant les métaux.

³⁰ L'interprétation de l'impact de la consommation électrique est identique pour l'ensemble des scénarios étudiés. En conséquence, pour l'interprétation des résultats des autres scénarios, nous ne préciserons plus que l'impact environnemental est principalement dû aux activités d'extraction et/ou de combustion du charbon dans les centrales thermiques de l'île.

³¹ De la même façon que pour l'impact de destruction de l'ozone photochimique, les radiations ionisantes ne seront pas interprétées, mais les résultats resteront apparents.

3.4.3.1.2. Scénario « Palette » CFPPA

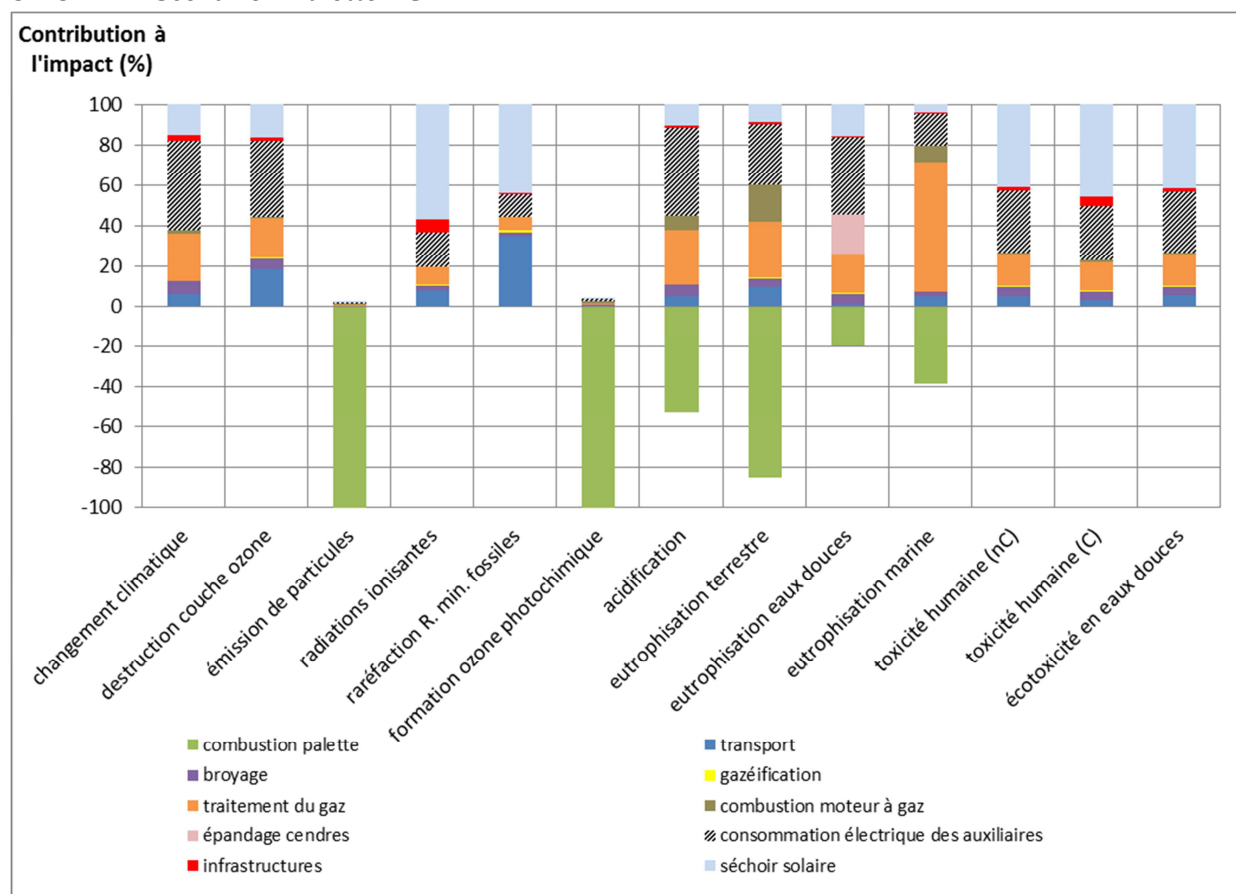


FIGURE 27 : DIAGRAMME DE CONTRIBUTION AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR LE SCENARIO "PALETTE CFPPA" (METHODE ILCD 2011, MIDPOINT)

3.4.3.1.2.1. Effets sur le changement climatique

Les trois principales étapes émettrices de GES sont la consommation électrique des auxiliaires (43%), le traitement des gaz (26%) et le séchage solaire (15%). La consommation électrique représente 94% des émissions relatives au traitement des gaz. Elle s'explique par la production d'électricité à partir de charbon qui est responsable de 75% des émissions de la consommation électrique. Les émissions de GES du séchage solaires correspondent aux étapes de production des bennes de séchage. Le broyage et le transport des palettes ne représentent que 6% chacun des émissions de GES.

3.4.3.1.2.2. Destruction de la couche d'ozone

La destruction de la couche d'ozone est provoquée à part sensiblement égales par la consommation électrique des auxiliaires (37%), le traitement des gaz (21%), le transport des palettes (18%) et le séchage solaire (16%). Comme pour le scénario acacia, plus de 80% de l'impact est lié à la consommation de pétrole, présent dans le mix électrique et les transports.

3.4.3.1.2.3. Emissions de particules

Les émissions de particules sont globalement négatives pour le système étudié, c'est-à-dire que la production d'électricité à partir de palette permet d'éviter l'émission de particules, soit 0,0137 kg PM_{2,5} eq/kWh. Ces émissions évitées sont relatives à l'absence de combustion des palettes. Les émissions positives de particules représentent une part minime des émissions évitées (<1%).

3.4.3.1.2.4. Effet des radiations ionisantes sur la santé humaine

Les radiations ionisantes sont principalement provoquées par le séchage solaire (à 57%), puis de façon plus faible, par la consommation électrique des auxiliaires (16%), et par d'autres étapes du cycle de vie (traitement du gaz à 10%, transport des palettes 8% et infrastructures 7%). Le fort impact du séchage s'explique par les process de fabrication de l'aluminium des bacs de séchage, notamment à partir d'énergie nucléaire.

3.4.3.1.2.5. Epuisement des ressources minérales et fossiles

L'épuisement des ressources minérales et fossiles est principalement le fait des ressources minérales, puisque les ressources fossiles ne représentent qu'environ 1% des impacts. Les étapes qui contribuent le plus sont celles du séchage solaire (44%), le transport de palettes (35%), la consommation électrique des auxiliaires (11%) et le traitement des gaz (7%). Comme pour l'acacia, le fort impact du séchoir solaire est lié à l'utilisation de minéraux tels que le chrome, le cuivre, l'étain ou le zinc au niveau de la plaque de solaire thermique.

3.4.3.1.2.6. Formation d'ozone photochimique

L'impact global sur la formation d'ozone photochimique est négatif, c'est-à-dire, comme pour les émissions de particules, que la production d'électricité à partir de bois de palette permet d'éviter la formation d'ozone photochimique. Ces émissions évitées sont relatives à l'absence de combustion du bois de palette, qui ne vont pas émettre de COVNM. L'absence de combustion permet ainsi de ne pas émettre 0,041 kg COVNM eq/kWh.

3.4.3.1.2.7. Acidification

L'acidification est principalement causée par la consommation électrique des auxiliaires (41%) et par le traitement du gaz (30,3%). L'absence de combustion des palettes permet de réduire de 50,3% les émissions en SO₂ et NO_x.

3.4.3.1.2.8. Eutrophisation terrestre

L'eutrophisation terrestre est principalement causée par le traitement des gaz (34%), par la consommation électrique des auxiliaires (28%) et par la combustion du syngaz dans le moteur (17%). L'absence de combustion du bois de palette permet de réduire l'impact de 78 % via la réduction des émissions de NO_x. L'impact du traitement des gaz s'explique par les émissions relatives au traitement des eaux de lavage contenant les condensats en STEP, responsables d'émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote (NO_x). L'impact de la consommation électrique des auxiliaires s'explique par les émissions relatives à l'extraction du charbon. La combustion du syngaz émet quant à elle des NO_x.

3.4.3.1.2.9. Eutrophisation en eaux douces

L'eutrophisation en eaux douces est principalement causée par la consommation électrique des auxiliaires (37%), le traitement des gaz (21%), l'épandage des cendres (19%), le séchoir solaire (16%). L'absence de combustion du bois de palette permet d'éviter 19% des émissions, du fait du retour du phosphore (P) vers le sol. Cependant, ces impacts évités de la combustion des palettes sont totalement compensés par l'épandage des cendres de gazéification qui regroupent 100% du phosphore de la biomasse brute. Comme pour l'Acacia, l'impact de la consommation électrique des auxiliaires et du traitement des gaz est dû aux émissions de phosphate liées à l'extraction du charbon. L'impact du séchoir solaire est principalement lié aux étapes de recyclage de la plaque solaire thermique.

3.4.3.1.2.10. Eutrophisation marine

L'impact sur l'eutrophisation marine est principalement causé par le traitement des gaz (64%). L'absence de combustion du bois de palette permet d'éviter 38% des émissions. La très forte contribution du

traitement des gaz s'explique par les émissions de NH_3 contenues dans les condensats des gaz traités en STEP.

3.4.3.1.2.11. Toxicité humaine non cancérigène

La toxicité humaine non cancérigène est due à 41% au séchage solaire, 30% à la consommation électrique des auxiliaires et 17% au traitement des gaz. La contribution du séchage solaire s'explique par les émissions de zinc (60%) et d'arsenic (38%) lors de l'étape de fin de vie de la plaque de solaire thermique. Les impacts liés au traitement du gaz et à la consommation électrique des auxiliaires sont dus aux émissions lors de l'extraction du charbon (zinc 57% et arsenic 39%).

En excluant les métaux comme pour l'Acacia, l'impact est causé par l'utilisation d'un herbicide présent dans la production de canne à sucre, source d'énergie du mix électrique.

3.4.3.1.2.12. Toxicité humaine cancérigène

La toxicité non cancérigène est principalement causée par le séchage solaire (46%), la consommation électrique des auxiliaires (26%) et le traitement des gaz (15%). L'impact du séchage solaire s'explique par l'utilisation d'aluminium dans les bacs de séchage (78% des émissions du bac de séchage). Les contributions de la consommation électrique des auxiliaires et le traitement des gaz s'expliquent par les émissions de chrome (98% des émissions) des activités d'extraction du charbon.

En excluant les métaux, comme pour l'Acacia, l'impact est causé par l'utilisation d'un pesticide dans la production de canne à sucre, ainsi que de formaldéhyde issu de la combustion du fioul du mix électrique.

3.4.3.1.2.13. Ecotoxicité en eaux douces

L'écotoxicité est principalement causée par le séchoir solaire (42%), la consommation électrique des auxiliaires (30%) et le traitement des gaz (17%). La contribution du séchoir solaire s'explique par les émissions de zinc et de cuivre. La consommation électrique des auxiliaires et le traitement des gaz sont liés aux activités d'extraction du charbon (31 % des impacts du cycle de vie).

En excluant les métaux, l'écotoxicité est principalement causé par un herbicide utilisé pour la production de canne à sucre.

3.4.3.1.2.14. Synthèse des impacts environnementaux du scénario Palette CFPPA

Pour le scénario « Palette CFPPA », les étapes qui contribuent le plus aux impacts environnementaux sont la consommation électrique de la plateforme, le séchoir solaire et le traitement des gaz.

La définition du système inclut les émissions évitées par rapport à un scénario de référence où les palettes seraient brûlées. Cette hypothèse conduit à un bilan d'émissions négatives pour l'émission de particules et l'ozone photochimique ; car la gazéification est un procédé qui n'émet pas (ou très peu) de particules ou de composés organiques volatiles. D'autres indicateurs incluent des émissions négatives qui réduisent les impacts de la gazéification (acidification, eutrophisation marine) ou compensent les émissions relatives à l'épandage des cendres (impact sur l'eutrophisation en eaux douces).

Pour les autres étapes liées à la gazéification, on retrouve des contributions similaires au scénario Acacia ; à savoir : le traitement des gaz en STEP qui contribue le plus à l'eutrophisation marine, le séchoir solaire qui contribue principalement aux radiations ionisantes, à la raréfaction des ressources minérales et fossiles et aux toxicités humaines et des écosystèmes. Enfin, le broyage et les infrastructures contribuent très faiblement aux différents impacts.

3.4.3.1.3. Pailles de canne

Pour ce scénario, les contributions des différentes étapes du système seront décrites, en revanche seules les émissions de substances pour les nouveaux processus analysés seront mentionnées (mise en balle des pailles, scénario de référence avec restitution des pailles au champ, granulation). Les substances émises par les autres processus sont semblables.

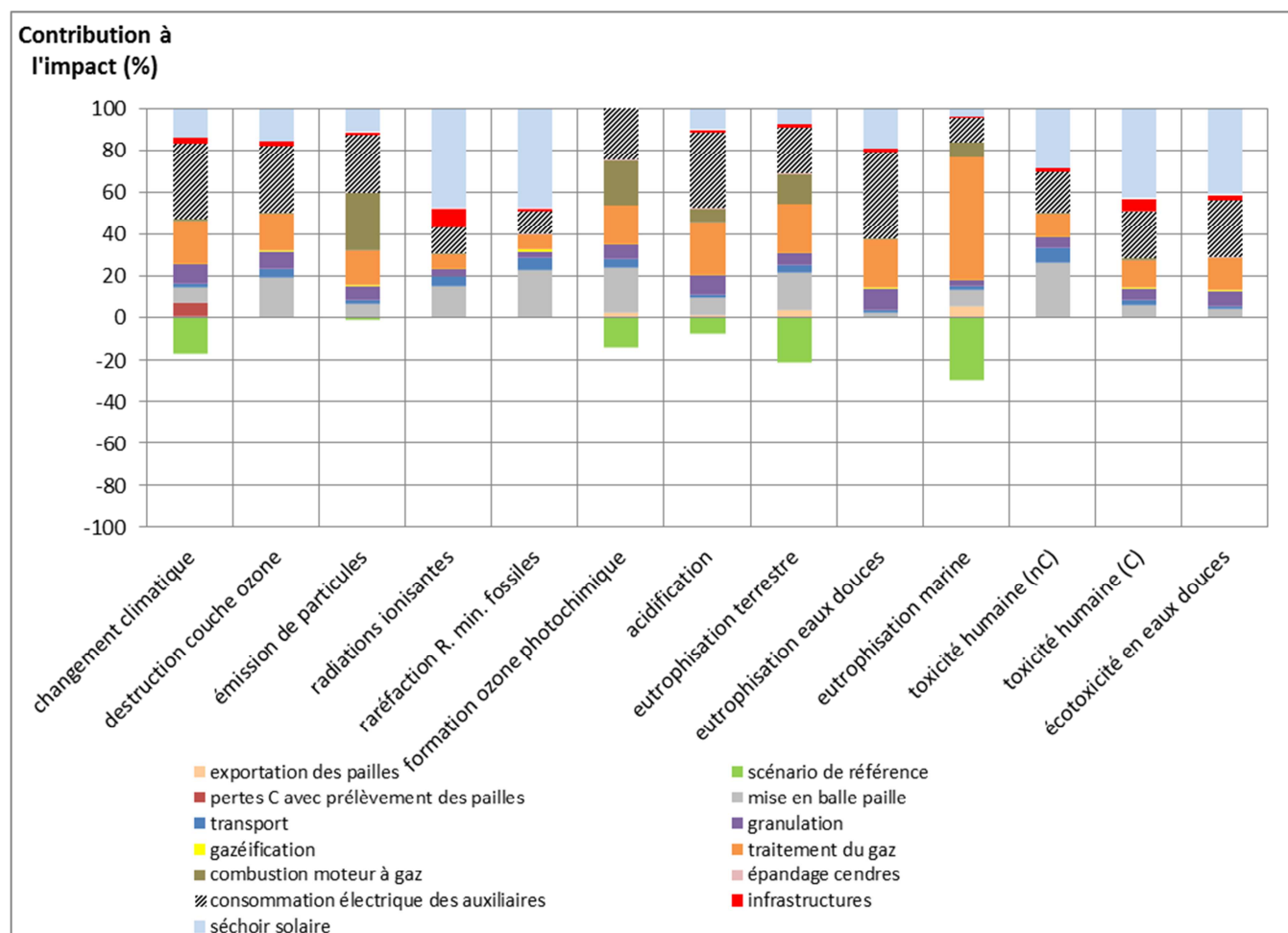


FIGURE 28 : DIAGRAMME DE CONTRIBUTION AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR LE SCENARIO "PAILLE CFPPA" (METHODE ILCD 2011, MIDPOINT)

3.4.3.1.3.1. Effets sur le changement climatique

Les principales activités du cycle de vie responsables de l'émission de GES sont : la consommation électrique des auxiliaires (33%), le traitement du gaz (22%), le séchage solaire (13%), la mise en balle des pailles (11%). L'exportation de paille permet principalement d'éviter l'émission de N₂O, GES à haut pouvoir de réchauffement climatique, émis lors de la dégradation des résidus de paille. En revanche, elle conduit à une baisse du stock de carbone dans le sol, émis sous forme de CO₂, mais dont l'impact est très faible (< 1%). La granulation n'est responsable que de 9% des émissions de GES. Le transport des balles ne contribue que très faiblement aux émissions de GES (moins de 2%) du fait de la très courte distance de transport (< 2km). Les émissions de GES de la consommation électrique des auxiliaires et du traitement du gaz sont liées à la production d'électricité à partir de charbon.

3.4.3.1.3.2. Destruction de la couche d'ozone

La destruction de la couche d'ozone est principalement provoquée par la consommation électrique des auxiliaires (31%), la mise en balle des pailles (19%), le traitement des gaz (19%) et le séchage solaire

(15%). Au total la consommation électrique (auxiliaires de la plateforme et groupe froid pour le traitement des gaz) représente 58% des émissions responsables de la destruction de la couche d'ozone. Comme pour les autres scénarios, l'impact est expliqué par la consommation de pétrole pour le fonctionnement ou la fabrication des équipements.

3.4.3.1.3.3. Emissions de particules

Les émissions de particules sont principalement causées par la consommation électrique des auxiliaires (27%), la combustion du syngaz dans le moteur (27%), le traitement du gaz (18%) et le séchage solaire (11%). La consommation électrique totale représente 50% des émissions de particules, liées à la production d'électricité à partir de charbon. La combustion de gaz dans le moteur émet 26% des particules. Sur l'ensemble du système, l'émission de particules PM_{2,5} représentent 61% des particules, le dioxyde de soufre en représente 35%.

3.4.3.1.3.4. Effet des radiations ionisantes sur la santé humaine

L'effet des radiations ionisantes est principalement causé par le séchoir solaire (41%), et en moindre mesure par l'étape de mise en balle de la paille (15%) et la consommation électrique des auxiliaires (13%). Comme pour les autres scénarios, la forte contribution du séchoir solaire s'explique par l'énergie nucléaire utilisée pour produire la plaque de solaire thermique.

3.4.3.1.3.5. Epuisement des ressources minérales et fossiles

L'épuisement des ressources minérales et fossiles est principalement le fait des ressources minérales, car les ressources fossiles représentent moins de 2% de l'impact. Les étapes qui contribuent le plus sont : le séchoir solaire (47%), puis des étapes de mise en balle des pailles (23%) et de consommation électrique des auxiliaires (11%). Comme pour les autres scénarios, l'impact du séchoir solaire s'explique par l'utilisation de matériaux minéraux pour la production de la plaque thermique.

3.4.3.1.3.6. Formation d'ozone photochimique

La formation d'ozone photochimique est causée à parts sensiblement égales par la consommation électrique des auxiliaires (22%), la mise en balle des pailles (22%), le traitement des gaz (19%), la combustion du syngaz dans le moteur (17%), et dans une moindre mesure par le séchoir solaire (8%). L'exportation des pailles permet d'éviter 12% des émissions, du fait de la réduction des émissions de monoxyde d'azote (NO).

3.4.3.1.3.7. Acidification

L'acidification est provoquée à parts sensiblement égales par la consommation électrique des auxiliaires (37%), le traitement des gaz (30%), puis dans une moindre mesure par la mise en balle des pailles (10%) et le séchoir solaire (10%). L'impact de la mise en balle s'explique par l'utilisation de diesel et sa combustion dans le moteur du round-balleur.

3.4.3.1.3.8. Eutrophisation terrestre

Les principales étapes responsables de l'eutrophisation terrestre sont : le traitement des gaz (29%), la consommation électrique des auxiliaires (20%), la mise en balle des pailles (18%), la combustion du syngaz dans le moteur (13%). L'exportation des pailles réduit les émissions de 19%, via des émissions évitées d'oxyde d'azote. L'impact de la mise en balle des pailles s'explique par l'émission d'oxydes d'azote lors de la combustion du carburant dans l'équipement.

3.4.3.1.3.9. Eutrophisation en eaux douces

Les principales contributions à l'eutrophisation en eaux douces proviennent de la consommation électrique des auxiliaires (41%), le traitement des gaz (23%), le séchoir solaire (18%), et dans une moindre mesure par la granulation (11%). La forte contribution de la consommation électrique des auxiliaires et le

traitement des gaz provient de la production d'électricité à partir de charbon dont les émissions de phosphore sont liées aux activités extractives du charbon.

3.4.3.1.3.10. Eutrophisation marine

L'eutrophisation marine est causée à 59% par le traitement des gaz, du fait du traitement des eaux de lavage contenant les condensats de gazéification. L'exportation des pailles de canne permet en revanche de diminuer les émissions de 30% puisque l'azote contenu dans les pailles ne se dégrade pas au champ et n'est pas entraîné par ruissellement. Les principales émissions du scénario se composent à 57% d'oxydes d'azote (NOx, émission dans l'air), 36% d'ammoniac (émissions dans l'eau) et 18% de nitrates (émission dans l'eau).

3.4.3.1.3.11. Toxicité humaine non cancérigène

La toxicité humaine non cancérigène s'explique à part sensiblement égales par le séchoir solaire (28%), la mise en balle des pailles (27%), la consommation électrique des auxiliaires (19%) et le traitement des gaz (12%). Comme pour les autres scénarios, l'impact du séchoir solaire est lié à la fin de vie de la plaque de solaire thermique (émettrice de zinc et d'arsenic) et l'impact de l'électricité est lié aux activités d'extraction du charbon, émettrices de zinc et d'arsenic. L'impact de la mise en balle des pailles s'explique par les émissions de zinc lors du passage des engins agricoles au champ (du fait de l'usure des pneumatiques, lors de l'activité de mise en balle des pailles).

Comme pour les autres scénarios, en excluant les métaux, les émissions sont principalement liées à l'utilisation d'un herbicide pour la production de canne à sucre.

3.4.3.1.3.12. Toxicité humaine cancérigène

La toxicité humaine cancérigène est causée à 43% par le séchoir solaire, 22% par la consommation électrique des auxiliaires et 13% par le traitement des gaz. L'importance des émissions de chaque étape du scénario s'explique de la même façon que pour les autres scénarios.

Comme pour les autres scénarios, en excluant les métaux, les émissions sont principalement liées à l'utilisation d'un herbicide pour l'électricité produite à partir de bagasse de canne à sucre et de formaldéhyde pour l'électricité produite à partir de fioul.

3.4.3.1.3.13. Ecotoxicité en eaux douces

L'écotoxicité en eaux douces est causée à 41% par le séchoir solaire, 27 % par la consommation électrique des auxiliaires et 16% par le traitement des gaz. L'origine des émissions de chaque étape s'explique de la même façon que pour les scénarios précédents.

A nouveau, en excluant les métaux, les émissions sont principalement liées à l'utilisation d'un herbicide pour la production de canne à sucre.

3.4.3.1.3.14. Synthèse des impacts environnementaux du scénario Paille de canne CFPPA

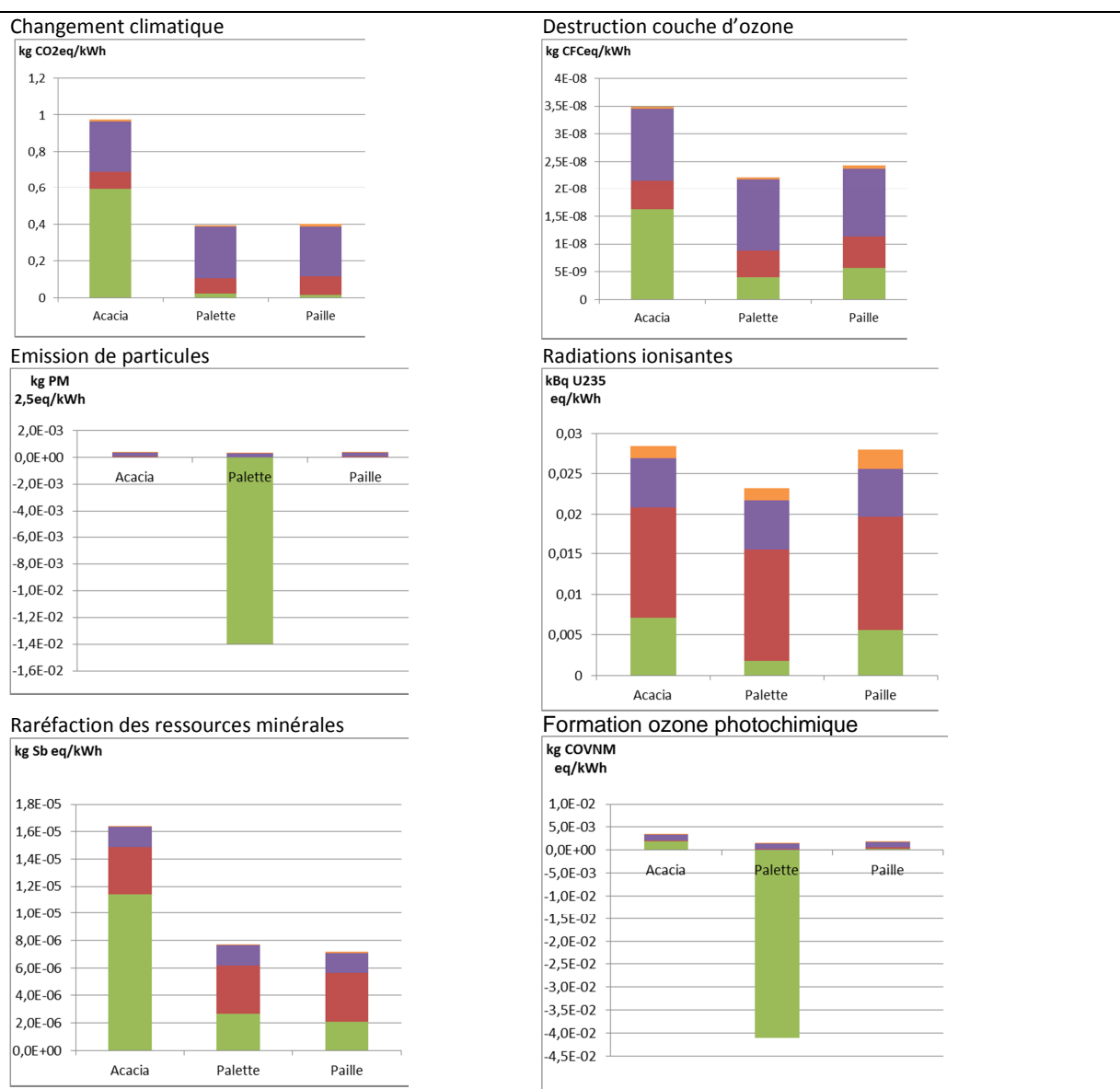
Les principales étapes du scénario « Paille de canne CFPPA » qui contribuent le plus aux impacts environnementaux sont celles de la consommation électrique de la plateforme, la mise en balle des pailles et le traitement des condensats de gazéification. L'exportation des pailles conduit à une très faible émission de CO₂, et permet de réduire les impacts d'autres indicateurs (changement climatique, formation d'ozone photochimique, eutrophisation terrestre, eutrophisation marine) lié à l'absence de dégradation des pailles au champ.

3.4.3.2. Comparaison des scénarios CFPPA

L'interprétation des contributions de chaque étape des scénarios a montré la prépondérance de la consommation électrique provenant du mix électrique réunionnais pour un grand nombre d'indicateurs.

Le regroupement des différentes étapes des scénarios selon des catégories uniques facilite la comparaison des scénarios. Quatre catégories sont créées et permettent de distinguer les contributions de :

- l'approvisionnement (exploitation de la biomasse, conséquences de l'exploitation de la biomasse, transport de la biomasse) ;
- la préparation de la biomasse (broyage ou granulation, séchage solaire) ;
- la gazéification (gazogène, combustion du gaz dans le moteur, traitement des gaz, épandage des cendres, consommation électrique des auxiliaires) ;
- et les infrastructures (bâtiment et hangar de stockage).



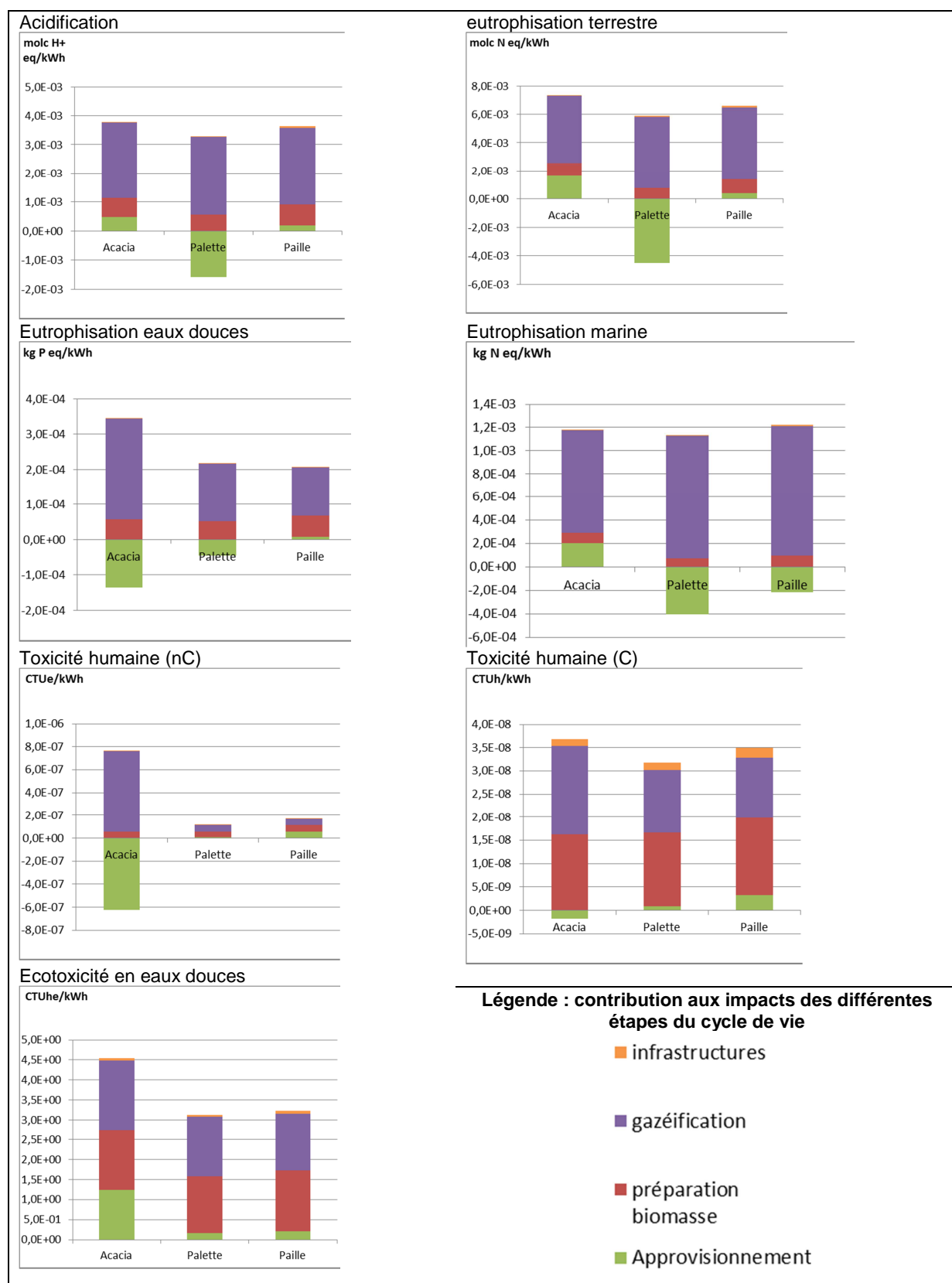


FIGURE 29 : COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES 3 SCENARIOS DU CFPPA SELON 4 ETAPES DU CYCLE DE VIE

La phase d'approvisionnement en biomasse a davantage d'impacts environnementaux pour le scénario « Acacia CFPPA » que pour les autres scénarios, particulièrement au niveau du changement climatique (61%), de l'épuisement des ressources minérales (69%) et de la formation d'ozone photochimique (55%).

Ceci est la conséquence des activités d'exploitation forestière, qui nécessitent des équipements lourds et la consommation de carburants d'origine fossile. Pour le changement climatique, cette différence est due au déstockage du carbone suite à l'exploitation forestière. L'importance de la phase d'approvisionnement en biomasse est visible également pour la destruction de la couche d'ozone, mais pour rappel, cet indicateur est jugé peu représentatif des systèmes analysés.

Pour les impacts régionaux relatifs à l'acidification et aux eutrophisations terrestre, marine et en eaux douces, ce sont les étapes relatives à la gazéification qui contribuent le plus, du fait de la consommation électrique, ainsi que de l'étape de traitement des eaux de lavage des condensats en STEP pour l'eutrophisation marine.

Concernant les impacts locaux, relatifs à la toxicité (toxicité humaine cancérigène ou non cancérigène, toxicité en eaux douces), il n'est pas possible de départager les performances des scénarios, d'autant plus que les sources d'impacts sont différentes (composition de la biomasse, activités d'exploitation forestière ou agricole, etc.).

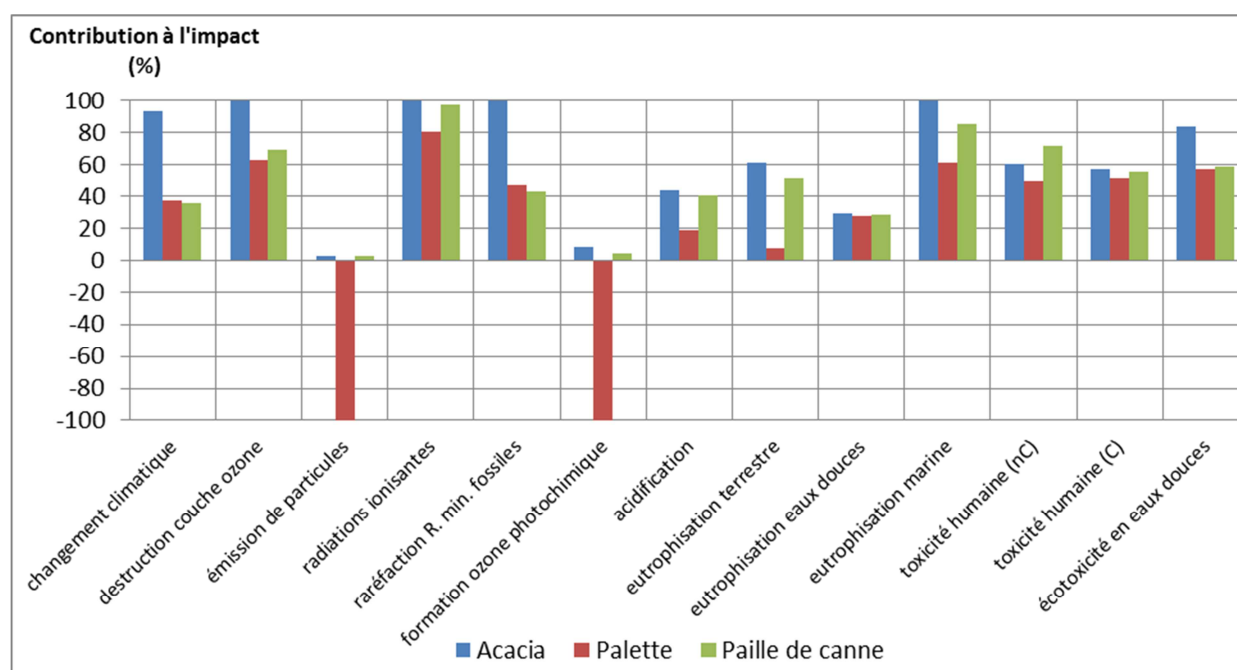


FIGURE 30 : COMPARAISON DES TROIS SCENARIOS CFPPA ACACIA, PALETTE, PAILLES DE CANNE

De façon globale, le scénario « Palette CFPPA » présente de meilleures performances sur l'ensemble des indicateurs. Tout d'abord, cela s'explique par un bilan négatif pour certains indicateurs : émissions de particules et ozone photochimique. Le scénario « Palette CFPPA » n'intègre pas d'activités liées à l'exploitation de la biomasse, cette dernière est collectée au niveau des stations de traitement de bois de palette et transportée vers la plateforme de gazéification, ce qui limite les impacts environnementaux. Enfin, il n'a pas été comptabilisé de zinc dans la composition des cendres de palette (métal lourd à fort impact). L'épandage des cendres, qui n'est pas compensé contrairement aux deux autres scénarios, a donc un faible impact.

Le scénario « Acacia CFPPA » présente les impacts les plus importants pour l'ensemble des indicateurs environnementaux. Les impacts sont particulièrement plus importants pour le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone et la raréfaction des ressources minérales.

Enfin, le scénario « Paille CFPPA » montre des résultats intermédiaires et contrastés, proche de ceux du scénario « Palette CFPPA » pour certains indicateurs (changement climatique, destruction de la couche d'ozone, raréfaction des ressources minérales et fossiles), ou du scénario « Acacia CFPPA » pour d'autres (radiations ionisantes, acidification, eutrophisation terrestre, etc.).

3.4.3.2.1. Comparaison avec l'électricité produite à partir de charbon et le mix électrique Réunion

La comparaison avec l'électricité produite à partir de charbon et avec le mix électrique Réunion permet d'analyser les performances des scénarios par rapport aux sources d'électricité à substituer (charbon) et existantes (mix électrique). La grille de comparaison des impacts (présentée en §2.4.5) est mobilisée pour cette analyse.³²

3.4.3.2.1.1. Comparaison des scénarios avec l'électricité produite à partir de charbon

3.4.3.2.1.1.1. Impacts de la production électrique du charbon

Pour rappel, la production d'électricité dans les centrales thermique est modélisée à partir de la base de donnée ecoinvent, avec un fonctionnement de centrale thermique représentatif de la métropole et avec un approvisionnement de charbon extrait en Afrique du Sud et transporté jusqu'à la Réunion. Les spécificités du fonctionnement des centrales thermiques de l'île de la Réunion n'ont pas pu être prises en compte sur l'ensemble des enjeux environnementaux faute de données, toutefois le §3.4.3.4.1.1 (page 115) analysera la sensibilité des résultats relatifs aux émissions de GES selon les données spécifiques issues du Bilan Energétique Réunion 2014.

La décomposition des impacts du cycle de vie indique que les étapes d'approvisionnement en charbon (extraction et transport) ainsi que la production électrique en centrale thermique présentent une importance variable selon les indicateurs. L'approvisionnement est l'étape ayant le plus d'impact pour les indicateurs suivants : la destruction de la couche d'ozone, les radiations ionisantes, la raréfaction des ressources minérales et fossiles, l'eutrophisation aquatique, la toxicité humaine cancérigène et non cancérigène et l'écotoxicité en eaux douces. La production d'électricité en centrale thermique présente les plus fortes contributions (70 à 90 % des impacts) pour le changement climatique, les émissions de particules, la formation d'ozone photochimique, l'acidification, l'eutrophisation terrestre et marine. Ces impacts sont alors dus directement aux émissions liées à la combustion du charbon. A noter en particulier que la production électrique représente 92 % de l'impact sur le changement climatique, du fait de l'émission de CO₂ par la combustion du charbon d'origine fossile.

³² Les indicateurs considérés comme peu pertinents dans cette étude « destruction de la couche d'ozone » et « radiations ionisantes » sont signalés entre parenthèse et en italique afin de faciliter la lecture.

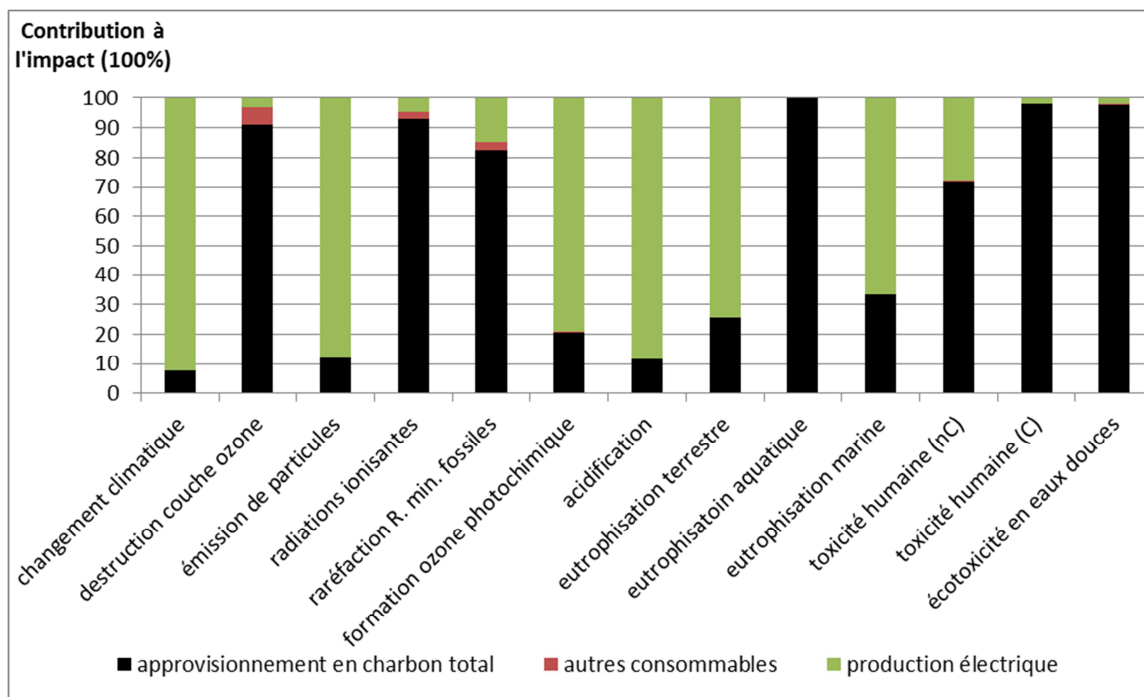


FIGURE 31 : CONTRIBUTION DES DIFFERENTES ETAPES DU CYCLE DE VIE POUR LA PRODUCTION ELECTRIQUE A PARTIR DE CHARBON

3.4.3.2.1.1.2. Impacts des scénarios CFPPA par rapport au charbon

TABEAU 26 : COMPARAISON DES SCENARIOS CFPPA PAR RAPPORT AUX IMPACTS DE L'ELECTRICITE PRODUITE A PARTIR DE CHARBON

Échelle	Impact	Acacia	Palette	Paille
Globale	Changement climatique			
Globale	(Destruction de la couche d'ozone)			
Globale	Raréfaction Ressources minérales et fossiles			
Régionale	(Radiations ionisantes)			
Régionale	Acidification			
Régionale	Eutrophisation terrestre			
Régionale	Eutrophisation eaux douces			
Régionale	Eutrophisation marine			
Locale	Emission de particules			
Locale	Formation ozone photochimique			
Locale	Toxicité humaine (nC)			
Locale	Toxicité humaine (C)			
Locale	Ecotoxicité en eaux douces			

Échelle d'évaluation des impacts en comparaison du charbon

Nettement plus polluant	Plus polluant	Similaire	Moins polluant	Nettement moins polluant
-------------------------	---------------	-----------	----------------	--------------------------

Au niveau des impacts globaux, les scénarios CFPPA présentent des résultats contrastés. Les impacts sur le changement climatique sont similaires à ceux de l'électricité issue du charbon³³ (1 034 g CO₂/kWh) pour le scénario « Acacia CFPPA » (975 g CO₂/kWh) et sont nettement moins polluants pour les scénarios « Palette CFPPA » (396 g CO₂/kWh) et « Paille CFPPA » (400 gCO₂/kWh). Cela s'explique par les étapes d'approvisionnement en biomasse, où les pertes de carbone sont comptabilisées pour le scénario « Acacia CFPPA », alors que le scénario « Palette CFPPA » n'en contient pas (valorisation d'un déchet) et que le scénario « Paille CFPPA » comporte peu de pertes de carbone suite à l'exportation des pailles et conduit à éviter des émissions de N₂O par l'absence de dégradation des pailles. Ce résultat peut paraître surprenant pour le scénario Acacia où l'impact provient à 51% des pertes de carbone par le déstockage de carbone (voir §3.4.3.1.1.1). Il sera analysé plus finement par analyse de sensibilité, notamment par la variation des hypothèses du scénario de référence et par celle des stocks de carbone des peuplements d'Acacia (voir §3.4.3.4.2). Au niveau de la raréfaction des ressources minérales et fossiles, les impacts des trois scénarios sont nettement plus élevés que pour le charbon. Cet indicateur exprime principalement la raréfaction des ressources minérales plutôt que celle des ressources fossiles, ce qui sera expliqué en fin de §3.4.3.2.1.2.

Pour les indicateurs d'échelle régionale, les impacts concernant l'acidification, l'eutrophisation terrestre, en eaux douces et marine sont moins polluants que le charbon, excepté pour l'eutrophisation marine où l'Acacia et la Paille sont classés comme similaires au charbon. Cela s'explique par les émissions d'azote évitées par l'absence de combustion pour le scénario « Palette CFPPA ».

Pour l'échelle locale, l'ensemble des impacts (émissions de particules, formation d'ozone photochimique, toxicité humaine et des écosystèmes) sont classés de niveau similaire à ceux du charbon, à l'exception de deux impacts relatifs au scénario « Palette CFPPA ». Pour ce dernier, les émissions de particules et la formation d'ozone photochimique sont classées comme « nettement moins polluant » du fait de la combustion évitée du bois de palette.

3.4.3.2.1.2. Comparaison des scénarios avec le mix électrique de la Réunion

3.4.3.2.1.2.1. Impacts de la production du mix électrique de la Réunion

La figure ci-dessous indique la contribution de chaque source d'énergie aux impacts environnementaux du mix électrique réunionnais. Le charbon, qui représente 42 % du mix électrique produit, contribue à plus de 70 % à la plupart des impacts environnementaux, excepté pour quelques indicateurs (destruction de la couche d'ozone, radiations ionisantes, raréfaction des ressources minérales et fossiles³⁴). Le photovoltaïque, qui représente 9 % du mix électrique produit, contribue à près de 77% à la raréfaction des ressources minérales et fossiles en raison de l'utilisation de minéraux rares constituant les cellules photovoltaïques (indium et tantale). L'électricité produite à partir de bagasse et d'énergie hydraulique, représentant respectivement 9 % et 15 % du mix électrique produit, contribuent faiblement aux impacts environnementaux du mix électrique de façon générale (respectivement 6 % et 2% pour les plus fortes contributions).

³³ Pour faciliter la lecture, il sera couramment fait référence aux « impacts du charbon » pour mentionner les impacts de l'électricité produite à partir de charbon.

³⁴ Ce résultat s'explique par la modélisation de cet indicateur dans la méthode ILCD (préconisation européenne) qui accorde un point plus important à la raréfaction des ressources minérales que fossiles (voir l'analyse de sensibilité, Figure 33 p 110).

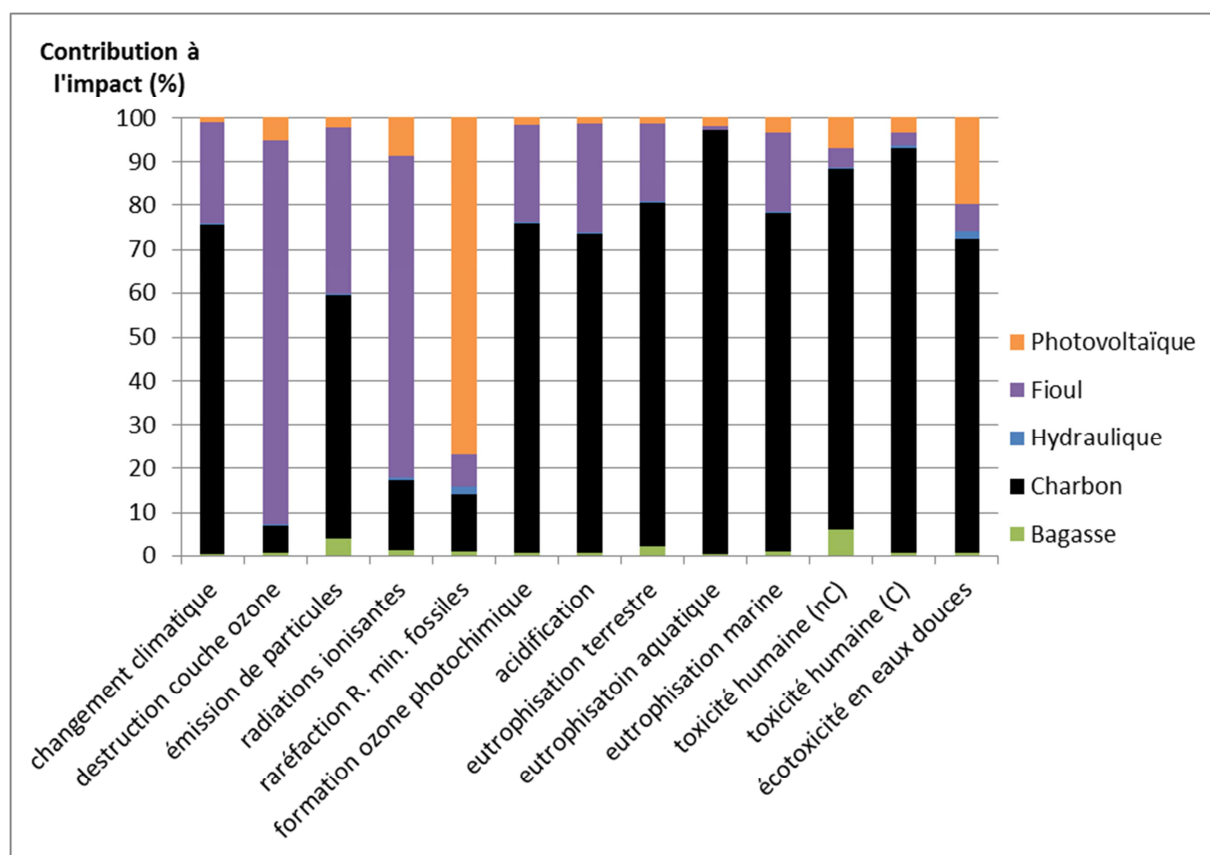


FIGURE 32 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU MIX ELECTRIQUE 2014 (BER 2014)

3.4.3.2.1.2.2. Impacts des scénarios CFPPA par rapport au mix électrique de la Réunion

Les performances environnementales des trois scénarios CFPPA présentent des impacts distincts en comparaison du mix électrique de la Réunion.

TABLEAU 27 : COMPARAISON DES SCENARIOS CFPPA PAR RAPPORT AUX IMPACTS DU MIX ELECTRIQUE DE LA REUNION

Échelle	Impact	Acacia	Palette	Paille
Globale	Changement climatique	+		
Globale	(Destruction de la couche d'ozone)	-	-	-
Globale	Raréfaction Ressources minérales et fossiles			
Régionale	(Radiations ionisantes)		-	
Régionale	Acidification	+		
Régionale	Eutrophisation terrestre	+	+	+
Régionale	Eutrophisation eaux douces			
Régionale	Eutrophisation marine	+	+	+
Locale	Emission de particules			
Locale	Formation ozone photochimique	+		
Locale	Toxicité humaine (nC)			
Locale	Toxicité humaine (C)			
Locale	Ecotoxicité en eaux douces			

Échelle d'évaluation des impacts en comparaison du charbon

Nettement plus polluant	Plus polluant	Similaire	Moins polluant	Nettement moins polluant
-------------------------	---------------	-----------	----------------	--------------------------

(les cases encadrées indiquent les indicateurs pour lesquels la classe d'impact a changé par rapport à la comparaison au charbon, le signe + indique un impact plus polluant, le signe – indique que l'impact est moins polluant).

La comparaison par rapport au mix électrique indique que l'ensemble des indicateurs demeurent dans la même classe de comparaison que dans le cas du charbon, excepté pour 5 indicateurs (en excluant les 2 indicateurs non pertinents) pour lesquels les impacts environnementaux sont devenus plus polluants. Il s'agit du changement climatique, de l'acidification, de l'eutrophisation terrestre et marine et de la formation d'ozone photochimique. En ce qui concerne le changement climatique, l'impact change de catégorie uniquement pour le scénario Acacia, il passe dans la catégorie « nettement plus polluant » que le mix électrique. Cela s'explique par les faibles émissions du mix électrique, où l'intégration des EnR (hydraulique, bagasse, PV, soit 33% du mix) permet d'atténuer nettement les émissions de GES.

L'eutrophisation terrestre et marine est classée comme similaire ou plus polluante que le mix électrique, excepté pour le scénario Palette sur l'indicateur d'eutrophisation terrestre. Cet impact plus important s'explique par le faible impact du mix électrique sur ces deux indicateurs, du fait de l'intégration de l'énergie hydroélectrique qui diminue fortement les impacts.

Enfin, seul le scénario Acacia passe dans la catégorie « similaire » et « plus polluant » respectivement pour l'acidification et la formation d'ozone photochimique, du fait des émissions liées à l'abattage des arbres.

En ce qui concerne la raréfaction des ressources minérales et fossiles, les impacts des scénarios CFPPA sont nettement plus élevés que le charbon ou que le mix électrique. Cela s'explique par la méthode d'évaluation des impacts utilisée (van Oers et al. 2002) et préconisée par l'ILCD 2011. Cette dernière intègre l'état des réserves des ressources minérales et fossiles (réserves de base), ainsi que les niveaux de prélèvement sur ces réserves. La méthode considère que les ressources fossiles sont substituables entre elles : les réserves et les prélèvements comptabilisés intègrent donc l'ensemble des ressources fossiles. A l'inverse, les réserves des ressources minérales ne sont pas substituables et chaque type de minéral est

comptabilisé séparément. De fait, l'impact sur la raréfaction des ressources fossiles est faible pour le charbon.

De plus, cette méthode n'intègre pas le fait que l'épuisement des ressources fossiles et minérales répond à deux enjeux différents. Dans le cas des ressources fossiles, leur prélèvement et leur utilisation correspondent à une consommation de la ressource et à sa destruction : une fois utilisée en produit énergétique, cette ressource n'est plus utilisable. Pour les ressources minérales, leur prélèvement et utilisation correspond à une dégradation : la ressource peut être transformée et réutilisée.

La méthode ReCiPe permet de séparer les impacts sur la raréfaction de ces deux types de ressources. La Figure 33 montre ainsi que l'impact des scénarios sur la raréfaction des ressources fossiles (mesuré en $\text{kg fuel}_{\text{eq}}/\text{kWh}$) est nettement plus faible que pour le charbon (-50 à -60%) et plus faible que le mix électrique (-17 à -33%). A l'inverse, l'impact sur la raréfaction des ressources minérales (mesuré en $\text{kg Fe}/\text{kWh}$) est nettement plus élevé, du fait des équipements utilisés qui sont moins bien rentabilisés que sur les centrales thermiques ou autres technologies du mix électrique.

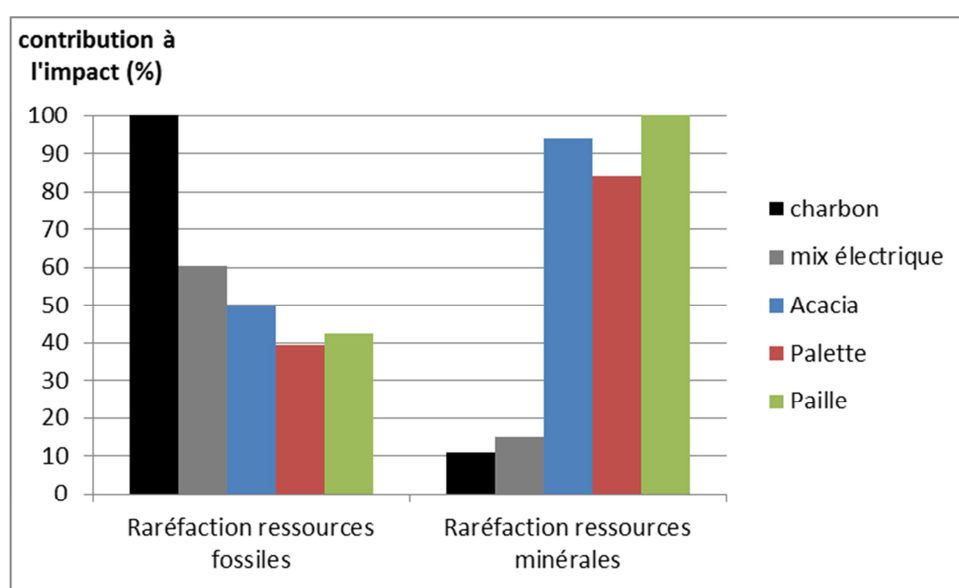


FIGURE 33 : EVALUATION DE L'IMPACT DE LA RAREFACTION DES RESSOURCES MINERALES ET FOSSILES SELON LA METHODE RECIPE

3.4.3.3. Scénarios Région

Les scénarios construits à l'échelle régionale visent à augmenter la production d'électricité (par la puissance installée et la durée de fonctionnement des unités de gazéification) et de rationaliser la consommation d'électricité. Ainsi, les équipements et infrastructures sont davantage amortis. Le séchage de la biomasse n'est plus effectué par séchage solaire mais par récupération de chaleur (refroidissement du syngaz, refroidissement du moteur à gaz et chaleur dégagée par les gaz d'échappement du moteur). Le transport de la biomasse est également limité de façon à rapprocher les lieux de production et de valorisation énergétique de la biomasse. Les comparaisons directes des scénarios aux deux échelles ne sont pas souhaitables étant donné que les objectifs poursuivis ne sont pas identiques (plateforme expérimentale pour le CFPPA, plateforme dédiée à la production d'électricité à l'échelle régionale). Cependant, afin de faciliter la lecture, nous nous focaliserons sur les changements de catégories d'impacts d'une échelle à l'autre dans la comparaison au charbon ou au mix électrique.

De façon globale, le changement d'échelle a permis de réduire les impacts environnementaux par kWh produit pour l'ensemble des indicateurs. La réduction des impacts est significative pour 3 indicateurs (en excluant les indicateurs non pertinents) : le changement climatique, l'eutrophisation terrestre et

l'eutrophisation en eaux douces. Ces différences s'expliquent par la réduction des impacts relatifs à la consommation d'électricité et à l'absence de séchage solaire pour lequel la plaque de solaire thermique avait un impact considérable.

TABLEAU 28 : COMPARAISON DES SCENARIOS REGION PAR RAPPORT AUX IMPACTS DE L'ELECTRICITE ISSUE DU CHARBON

Échelle	Impact	Acacia	Palette
Globale	Changement climatique	-	
Globale	<i>(Destruction de la couche d'ozone)</i>		
Globale	Raréfaction Ressources minérales et fossiles		
Régionale	<i>(Radiations ionisantes)</i>		-
Régionale	Acidification		-
Régionale	Eutrophisation terrestre		-
Régionale	Eutrophisation eaux douces		
Régionale	Eutrophisation marine		
Locale	Emission de particules		
Locale	Formation ozone photochimique		
Locale	Toxicité humaine (nC)		
Locale	Toxicité humaine (C)		
Locale	Ecotoxicité en eaux douces		

Échelle d'évaluation des impacts en comparaison du charbon

Nettement plus polluant	Plus polluant	Similaire	Moins polluant	Nettement moins polluant
-------------------------	---------------	-----------	----------------	--------------------------

(les cases encadrés indiquent les indicateurs pour lesquels la classe d'impact a changé par rapport à la comparaison des scénarios CFPPA avec le charbon, le signe + indique un impact plus polluant, le signe – indique que l'impact est moins polluant).

La comparaison avec les impacts du mix électrique montre que le changement d'échelle a également permis de diminuer les impacts de façon significative sur 3 indicateurs : l'acidification, la formation d'ozone photochimique (scénario Acacia uniquement) et enfin l'eutrophisation terrestre (pour le scénario Palette uniquement).

TABLEAU 29 : COMPARAISON DES SCENARIOS REGION PAR RAPPORT AUX IMPACTS DE L'ELECTRICITE ISSUE DU MIX ELECTRIQUE

Échelle	Impact	Acacia	Palette
Globale	Changement climatique		
Globale	<i>(Destruction de la couche d'ozone)</i>	-	-
Globale	Raréfaction Ressources minérales et fossiles		
Régionale	<i>(Radiations ionisantes)</i>	-	-
Régionale	Acidification	-	
Régionale	Eutrophisation terrestre		-
Régionale	Eutrophisation eaux douces		
Régionale	Eutrophisation marine		
Locale	Emission de particules		
Locale	Formation ozone photochimique	-	
Locale	Toxicité humaine (nC)		
Locale	Toxicité humaine (C)		
Locale	Ecotoxicité en eaux douces		

Échelle d'évaluation des impacts en comparaison du charbon

Nettement plus polluant	Plus polluant	Similaire	Moins polluant	Nettement moins polluant
-------------------------	---------------	-----------	----------------	--------------------------

(les cases encadrées indiquent les indicateurs pour lesquels la classe d'impact a changé par rapport à la comparaison aux scénarios CFPPA avec le mix électrique, le signe + indique un impact plus polluant, le signe – indique que l'impact est moins polluant).

Dans l'objectif de développer des unités de gazéification à l'échelle régionale, il apparaît que les scénarios étudiés s'avèrent globalement autant, voire moins polluants que le charbon ou que le mix électrique Réunion, excepté pour deux indicateurs :

- l'épuisement des ressources, qui est lié à l'utilisation de ressources minérales pour la construction des plateformes de gazéification et pour les équipements forestiers.
- Le changement climatique dans la comparaison au mix électrique où l'Acacia a un impact « nettement plus polluant ». A noter que la sensibilité de cet impact pour l'Acacia sera discutée dans les analyses, notamment en changeant le scénario de référence utilisé.

3.4.3.4. Analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilités permettent de mesurer l'influence des données, des hypothèses ou de la modélisation des systèmes sur les résultats obtenus.

En absence de mesures réalisables sur des installations existantes ou de bases de données suffisamment spécifiques, l'analyse environnementale des différents scénarios est basée sur de nombreuses estimations. Les résultats montrent que certaines étapes du cycle de vie ont une très faible contribution : le transport de la biomasse, la combustion du syngaz dans le moteur, le broyage, la granulation ou les infrastructures. A l'inverse d'autres étapes ont une contribution importante pour de nombreux indicateurs ; c'est le cas de la perte de carbone pour l'Acacia et de la consommation électrique (que l'on retrouve dans la consommation électrique des auxiliaires et le traitement du gaz du fait de la présence d'un groupe froid).

Dans l'objectif d'affiner l'analyse, il convient de mesurer l'influence des données relatives à ces étapes. Tout d'abord, l'influence de la valeur des émissions de GES du mix électrique sur l'interprétation des impacts sur le changement sera testée. Puis, dans une approche prospective, en concordance avec l'objectif d'autonomie énergétique et des engagements de certains industriels de l'île, une analyse sera également menée sur la diminution de la part de charbon dans le mix électrique, substituée par la bagasse.

Puis, certaines hypothèses peuvent être modifiées afin d'évaluer leur poids dans les résultats. Les hypothèses relatives à la prise en compte des stocks de carbone des peuplements d'Acacia des scénarios de référence utilisés seront testées. Egalement, le scénario de référence de mobilisation des peuplements d'Acacia sera modifié afin d'intégrer les activités réglementaires de lutte contre une espèce envahissante.

Ensuite, la variation de certains paramètres sera effectuée, comme le taux de consommation électrique sur la plateforme de gazéification.

Puis, une analyse de sensibilité concernant la modélisation des systèmes peut également être menée au niveau de l'origine de l'électricité utilisée sur la plateforme. Bien qu'au niveau réglementaire la totalité de l'électricité produite doit être injectée sur le réseau électrique local et que cette option soit techniquement difficilement réalisable, une analyse de sensibilité sera effectuée sur l'impact des scénarios si la consommation d'électricité de plateforme est assurée par celle produite par gazéification, ce qui revient à auto-consommer une partie de l'électricité produite.

3.4.3.4.1. Sensibilité aux émissions du mix électrique

3.4.3.4.1.1. Sensibilité aux valeurs d'émissions de GES du mix électrique

Le Bilan Énergétique Réunion 2014 fournit les émissions de CO₂ directes du mix électrique Réunion. Ces données n'ont pas été utilisées dans la modélisation du mix électrique car l'indicateur calculé est différent et que le détail des données n'est pas disponible. En effet, le BER calcule les émissions directes de CO₂ issues de la combustion de carburant dans les centrales thermiques de l'île (charbon, fioul ou gazole) et non l'ensemble des GES émis dans le cycle de vie de la production d'électricité, depuis l'extraction des matières premières, la construction des centrales thermiques, la combustion des carburants jusqu'à la fin de vie des équipements utilisés. Dans le BER, aucune émission de CO₂ n'est comptabilisée pour les énergies renouvelables (hydraulique, photovoltaïque) du fait de la prise en compte des émissions directes de CO₂ uniquement, y compris pour la bagasse en s'appuyant sur l'hypothèse de neutralité du carbone biogénique. À l'inverse, dans la modélisation du mix électrique de cette étude, des émissions de GES sont comptabilisées pour l'ensemble des énergies y compris les énergies renouvelables.

Enfin, le BER 2014, s'appuie sur les déclarations d'émissions de CO₂ annuelles directes fournies de façon réglementaire par les centrales thermiques. Le BER indique que les émissions de CO₂ directes consommées du mix électrique s'élèvent à 766 g CO₂/kWh (en incluant les pertes en lignes), soit 694 gCO₂/kWh sans les pertes en ligne. Les émissions de GES calculées dans cette étude pour le mix électrique sont nettement inférieures, avec 577 g CO₂/kWh. Cette différence est surprenante puisque la valeur fournie par le BER n'inclut pas les émissions du cycle de vie, ni celles des autres GES, et devrait donc être inférieure à celle calculée dans cette étude.

Cette différence peut s'expliquer par le fait que les émissions calculées dans cette étude pour le charbon (principales contributrices aux émissions du mix électrique) soient sous-estimées par rapport aux déclarations fournies par les centrales thermiques de l'île. La valeur utilisée dans cette étude indique une émission de GES de 1 034 g CO₂eq/kWh. Dans le BER, les émissions annuelles de CO₂ directes déclarées par les centrales thermiques s'élèvent à 1 989 524 t CO₂/an (Energie Réunion SPL et OER 2015). Sachant

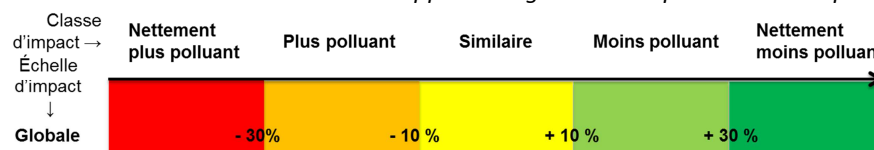
que ces émissions sont constituées à 77% par celles du charbon et que la production électrique annuelle issue du charbon s'élève à 1 211 GWh/an, nous en déduisons les émissions directes de CO₂ du charbon : 1 266 gCO₂/kWh. La différence entre les émissions de GES de cette étude et celles de CO₂ directes du BER est de 22%³⁵.

L'analyse de sensibilité menée dans les paragraphes suivants consiste alors à déterminer si cette incertitude sur la valeur des émissions de GES du charbon influence fortement les résultats et leur interprétation. Les scénarios aux échelles du CFPPA et de la Région seront à nouveau comparés, uniquement sur l'indicateur de changement climatique, en prenant les émissions de CO₂ directes du BER 2014 comme valeur des émissions de GES, soit 1 266 gCO₂(eq)/kWh.

TABLEAU 30 : SENSIBILITE DES EMISSIONS DE GES DE L'ENSEMBLE DES SCENARIOS A LA VALEUR D'EMISSION DE GES DU CHARBON

Echelle	Scénario	Comparaison aux émissions de charbon	
		étude de base ; données ecoinvent ; 1 034 g CO ₂ eq/kWh	Valeur BER 2014 ; 1 266 gCO ₂ /kWh
CFPPA	Acacia		
CFPPA	Palette		
CFPPA	Paille		
CFPPA	Canne fibre		
Région	Acacia		
Région	Palette		

Rappel de la grille de comparaison des impacts :



La comparaison des valeurs d'émissions de GES du charbon par rapport aux émissions des différents scénarios analysés dans cette étude montre que seuls les scénarios « Acacia CFPPA » et « Acacia Région » changent de classe d'impact. D'un impact classé comme « similaire » au charbon avec les émissions calculées à partir des bases de données ecoinvent, l'impact est classé comme « moins polluant » à l'échelle des scénarios CFPPA et « nettement moins polluant » pour l'échelle des scénarios Région avec les émissions du BER 2014. Ces résultats invitent donc à considérer les impacts sur le changement climatique des scénarios Acacia avec précaution dans le sens où ils apparaissent probablement comme surestimés.

3.4.3.4.1.2. Sensibilité à la composition du mix électrique

Compte tenu de l'impact du mix électrique (notamment du charbon) et des perspectives de substitution progressive du charbon par des énergies renouvelables, une analyse de sensibilité est menée sur l'évolution de la composition du mix électrique. Lors de la tenue des discussions relatives à la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE), la société Albioma s'est engagée à passer de 20 à 60% d'intégration de la biomasse dans sa centrale thermique d'ici 2023. Nous posons l'hypothèse pour cette

³⁵ Parmi les hypothèses permettant d'expliquer cette différence, se trouve celle des faibles rendements énergétiques au niveau des centrales thermiques de l'île. Deux éléments propres au contexte insulaire peuvent y contribuer : l'utilisation saisonnière des équipements avec la bagasse ou le charbon qui nécessitent des ajustements techniques et l'utilisation de ces centrales comme principales sources d'électricité sur l'île ce qui peut conduire à un fonctionnement en sous-régime par rapport à leur capacité nominale.

analyse de sensibilité, de l'augmentation d'un facteur 3 de la part de l'électricité produite à partir de bagasse en substitution de celle produite par le charbon.

L'analyse est menée sur le mix électrique suivant :

TABEAU 31 : COMPOSITION DU MIX ELECTRIQUE A LA REUNION EN 2014 (OER 2015) ET COMPOSITION ESTIMEE EN 2023 (PPE 2015)

Sources de production d'électricité	Part du mix électrique 2014 (%)	Part du mix électrique 2023 (%)
Charbon	42	24
Fioul	25	25
Hydraulique	15	15
Bagasse	9	27
Photovoltaïque	9	9

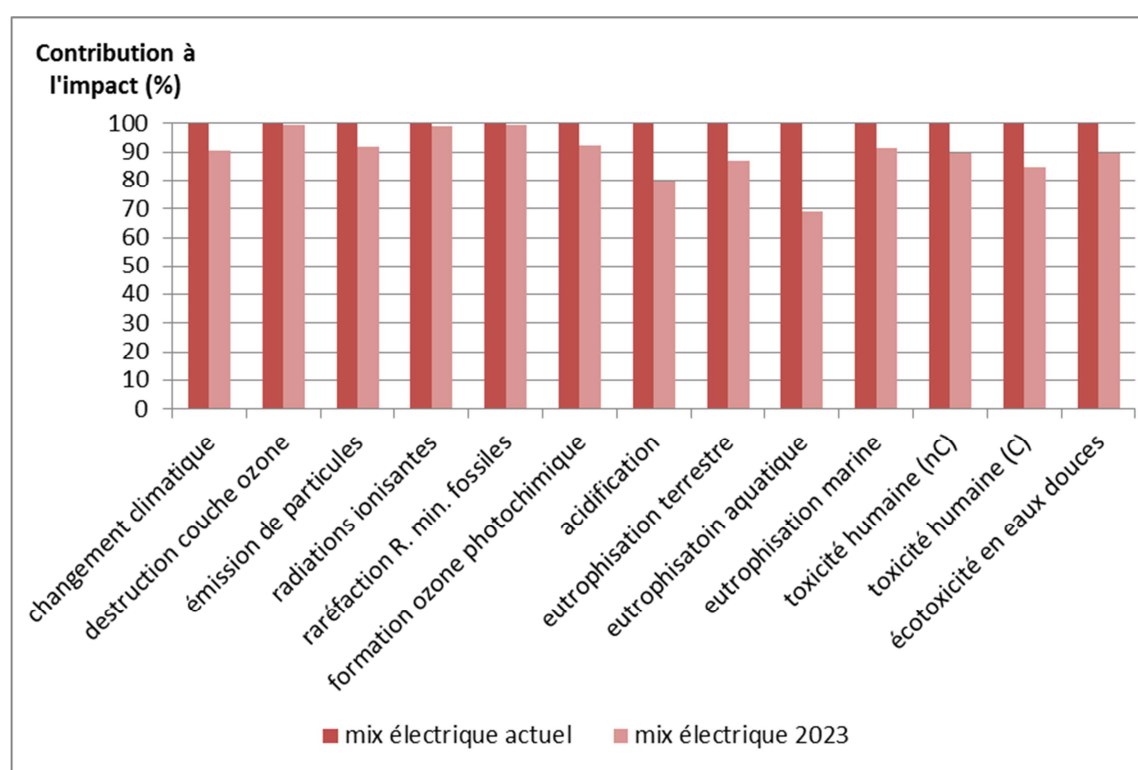


FIGURE 34 : CONSEQUENCES POUR LE SCENARIO ACACIA CFPPA DE L'EVOLUTION DE LA COMPOSITION DU MIX ELECTRIQUE (LE MIX ELECTRIQUE 2023 CORRESPOND A UNE AUGMENTATION PAR 3 DE L'ELECTRICITE PRODUITE A PARTIR DE BAGASSE, EN SUBSTITUTION DE CELLE PRODUITE PAR LE CHARBON)

Les résultats indiquent une baisse des impacts environnementaux pour tous les indicateurs avec la nouvelle composition de mix électrique. La plus forte baisse est observée pour l'eutrophisation en eaux douces (-31%), alors que certains paramètres y sont moins sensibles (destruction de la couche d'ozone, radiations ionisantes, raréfaction des ressources minérales et fossiles).

Lorsque l'on compare l'évolution des impacts pour chacun des scénarios avec le charbon (Tableau 32), seuls trois indicateurs changent de catégorie d'impact avec une diminution significative de leur impact : le changement climatique pour le scénario « Acacia CFPPA », l'acidification pour le scénario « Palette CFPPA », l'émission de particules pour le scénario « Paille CFPPA ».

TABLEAU 32 : COMPARAISON DES SCENARIOS CFPPA AVEC UN MIX ELECTRIQUE 2023 PAR RAPPORT AUX IMPACTS DU CHARBON

Échelle	Impact	Acacia CFPPA avec mix élec 2023	Palette CFPPA avec mix élec 2023	Paille CFPPA avec mix élec 2023
Globale	Changement climatique	-		
Globale	<i>(Destruction de la couche d'ozone)</i>			
Globale	Raréfaction Ressources minérales et fossiles			
Régionale	<i>(Radiations ionisantes)</i>			
Régionale	Acidification		-	
Régionale	Eutrophisation terrestre			
Régionale	Eutrophisation eaux douces			
Régionale	Eutrophisation marine			
Locale	Emission de particules			-
Locale	Formation ozone photochimique			
Locale	Toxicité humaine (nC)			
Locale	Toxicité humaine (C)			
Locale	Ecotoxicité en eaux douces			

Échelle d'évaluation des impacts en comparaison du charbon

Nettement plus polluant	Plus polluant	Similaire	Moins polluant	Nettement moins polluant
----------------------------	---------------	-----------	----------------	-----------------------------

(les cases encadrées indiquent les indicateurs pour lesquels la classe d'impact a changé par rapport à la comparaison scénarios CFPPA/charbon, le signe + indique un impact plus polluant, le signe – indique que l'impact est moins polluant).

Lorsque l'on compare l'évolution des impacts par rapport au mix électrique actuel, trois indicateurs diminuent de façon significative et changent de catégorie d'impact : l'acidification pour le scénario « Acacia CFPPA », l'eutrophisation terrestre pour le scénario « Palette CFPPA » et la formation d'ozone photochimique pour le scénario « Acacia CFPPA ».

TABLEAU 33 : COMPARAISON DES SCENARIOS CFPPA AVEC LE MIX ELECTRIQUE 2023, PAR RAPPORT AUX IMPACTS DU MIX ELECTRIQUE 2014 DE LA REUNION

Échelle	Impact	Acacia CFPPA avec mix élec 2023	Palette CFPPA avec mix élec 2023	Paille CFPPA avec mix élec 2023
Globale	Changement climatique			
Globale	<i>(Destruction de la couche d'ozone)</i>			+
Globale	Raréfaction Ressources minérales et fossiles			
Régionale	<i>(Radiations ionisantes)</i>			
Régionale	Acidification	-		
Régionale	Eutrophisation terrestre		-	
Régionale	Eutrophisation eaux douces			
Régionale	Eutrophisation marine			
Locale	Emission de particules			
Locale	Formation ozone photochimique	-		
Locale	Toxicité humaine (nC)			
Locale	Toxicité humaine (C)			
Locale	Ecotoxicité en eaux douces			

Échelle d'évaluation des impacts en comparaison du charbon

Nettement plus polluant	Plus polluant	Similaire	Moins polluant	Nettement moins polluant
-------------------------	---------------	-----------	----------------	--------------------------

(les cases encadrées indiquent les indicateurs pour lesquels la classe d'impact a changé par rapport à la comparaison scénarios CFPPA/mix électrique 2014, le signe + indique un impact plus polluant, le signe – indique que l'impact est moins polluant).

Ces résultats indiquent que les impacts environnementaux de l'électricité issue de gazéification pourront être améliorés sur certains indicateurs (particulièrement l'acidification, l'eutrophisation terrestre et la formation d'ozone photochimique) si le mix électrique se conforme aux objectifs de la PPE.

3.4.3.4.2. Le déstockage de carbone des peuplements forestiers

Compte tenu de la forte contribution des pertes de carbone relatives à l'exploitation forestière des peuplements d'Acacia pour l'indicateur de changement climatique, une analyse de sensibilité est réalisée sur cet aspect. Le paramètre étudié est le stock de carbone du scénario de référence. Dans le cas du scénario Acacia CFPPA, le scénario de référence établit que les zones exploitées sont occupées par un couvert forestier d'Acacia à l'état mature (stock de C de 57,5 t C/ha) qui serait maintenu en absence de valorisation énergétique de l'Acacia. L'analyse de sensibilité consiste alors à modifier le scénario de référence à partir de deux autres hypothèses :

- Un scénario de référence 2, où seule l'hypothèse de stock de carbone des peuplements matures est modifiée. Le stock de C des peuplements matures est fixé à partir de la valeur haute des données de la littérature, soit 82,3 t C/ha (peuplement mature > 10 ans, mesures Hauville, CIRAD 2005). L'hypothèse de croissance ligneuse est conservée, avec un rendement de 11,5 tMS/ha/an ainsi que l'hypothèse d'exploitation forestière à 10 ans. Les pertes de carbone s'élèvent alors à 98,1 t CO₂/ha/an.
- Un scénario de référence 3, où l'on intègre les principes de la politique de lutte contre cette espèce invasive. Le scénario de référence 3 consiste à considérer que le peuplement mature

d'Acacia a vocation à disparaître, soit au profit d'un reboisement par une espèce endémique (Tamarin de Hauts par exemple), soit d'une surface non boisée (éventuellement une surface agricole exploitable). Afin de se placer dans une situation contrastée d'un point de vue des stocks de carbone, nous considérerons le cas d'une surface non boisée pour cette analyse de sensibilité. Ainsi, la surface devrait être entretenue de façon à éviter la repousse de l'Acacia au moyen de différentes activités (comme le sous-solage, labour profond, désherbage régulier, etc.). Nous ne comptabiliserons pas les émissions liées à ces activités, puisque l'analyse de sensibilité est réalisée uniquement sur le stock de carbone. Dans le cas d'une surface non boisée, le stock de carbone de la biomasse aérienne est considéré comme nul. En comparaison, l'exploitation de l'Acacia dans le scénario de gazéification correspond à un stockage de carbone, de 52,7 tC/ha, soit l'opposé du déstockage considéré dans le scénario de référence 1.

L'évaluation totale des impacts environnementaux pour ce scénario de référence 3 serait intéressante, mais les informations sur les moyens de lutte et sur les alternatives d'occupation des terres libérées de l'Acacia ne sont pas disponibles à ce jour.

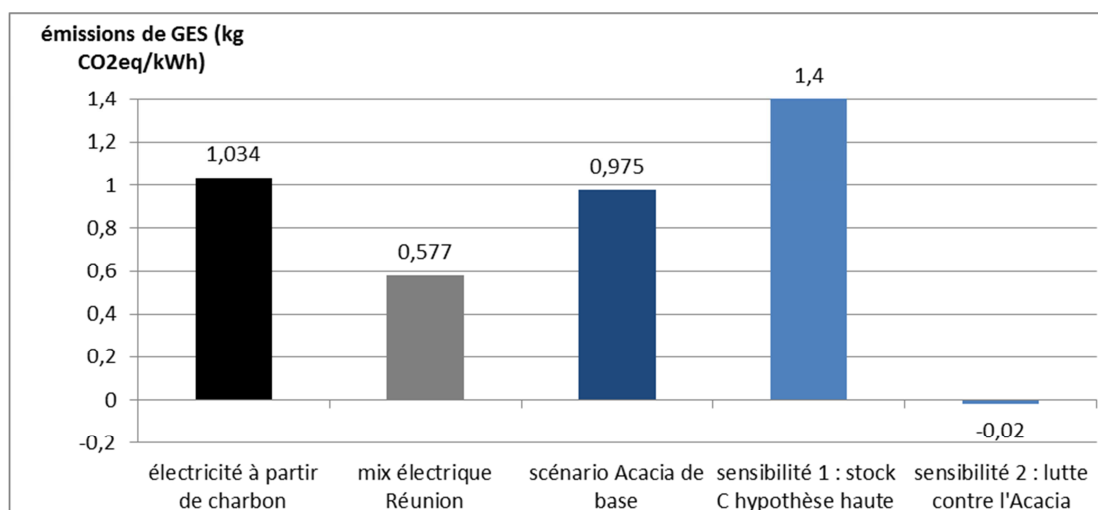


FIGURE 35 : EMISSIONS DE GES DU SCENARIO ACACIA CFPPA SELON LES HYPOTHESES SCENARIOS DE REFERENCE

Les résultats montrent que l'indicateur de changement climatique est très sensible à ces hypothèses. Pour une augmentation de 43% du stock de carbone des peuplements matures (scénario de référence 2), les émissions de GES ont augmenté également de 43%.

Pour la modification du scénario de référence avec l'intégration de la lutte contre l'espèce invasive et le retour à un espace non boisé (scénario de référence 3), les émissions deviennent globalement négatives (-20 gCO₂/kWh). Ce résultat signifie que l'exploitation régulière de bois d'Acacia permet de stocker du carbone, si l'on considère que cet espace serait systématiquement défriché en absence de valorisation énergétique.

Au vue de ces analyses, il convient de nuancer fortement les résultats obtenus concernant le changement climatique pour les scénarios Acacia (CFPPA et Région), puisque le scénario de référence influence fortement les émissions de GES. Ce résultat montre l'importance d'intégrer les politiques d'aménagement des territoires dans l'analyse environnementale, et notamment d'intégrer au mieux les actions de lutte contre une espèce invasive.

3.4.3.4.3. La consommation électrique de la plateforme

Les impacts environnementaux sont recalculés pour une baisse de la consommation électrique de la plateforme comprenant les équipements auxiliaires, le broyeur et le groupe froid. D'un point de vue technique, une consommation de 30% de l'électricité produite serait un objectif ambitieux mais réaliste, ce qui correspond à une baisse de 23% par rapport à la configuration estimée de la plateforme (39 % de consommation électrique). L'analyse est réalisée sur les trois scénarios du CFPPA afin d'identifier les variations les plus fortes.

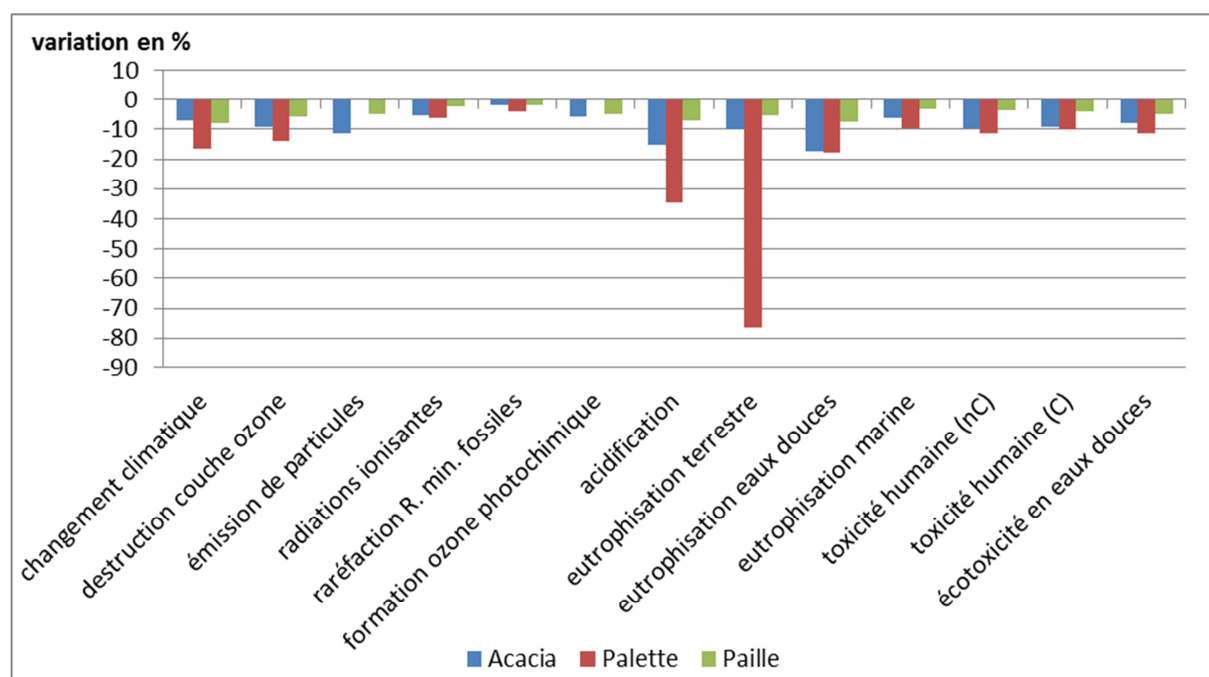


FIGURE 36 : SENSIBILITE A LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DE LA PLATEFORME POUR LES 3 SCENARIOS CFPPA (BAISSE DE LA CONSOMMATION DE 23%)

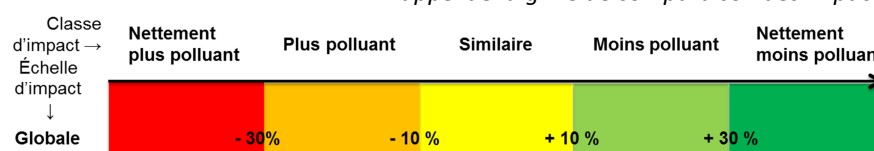
L'analyse de sensibilité montre que tous les indicateurs environnementaux sont affectés par la baisse de consommation électrique. Certains y sont très sensibles comme l'acidification et l'eutrophisation terrestre. Une baisse de 23 % de la consommation électrique conduit à une réduction de 15, 35 et 7 % de l'acidification et de 10, 77 et 5 % de l'eutrophisation terrestre respectivement pour les scénarios acacia, palette et paille. Les indicateurs les moins sensibles sont les radiations ionisantes, la raréfaction des ressources minérales et la formation d'ozone photochimique et l'eutrophisation marine.

Cette analyse indique qu'une conception de la plateforme de gazéification visant à réduire la consommation électrique permettrait d'améliorer considérablement certains impacts environnementaux. Cette nouvelle conception plus sobre en consommation électrique permettrait d'obtenir un bilan environnemental plus intéressant au niveau des impacts sur le changement climatique. En comparaison au charbon, seul cet indicateur change de classe d'impact pour l'Acacia, en passant dans la catégorie « moins polluant ».

TABLEAU 34 : COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX A CEUX DE L'ELECTRICITE ISSUE DU CHARBON, AVEC REDUCTION DE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DE LA PLATEFORME DE 23%.

Échelle	Impact	Acacia -23%	Palette -23%	Paille -23%
globale	Changement climatique	-		
globale	(Destruction couche ozone)			
globale	Raréfaction R. min. fossiles			
régionale	(Radiations ionisantes)			
régionale	Acidification			
régionale	Eutrophisation terrestre			
régionale	Eutrophisation eaux douces			
régionale	Eutrophisation marine			
locale	Emission de particules			
locale	Formation ozone photochimique			
locale	Toxicité humaine (nC)			
locale	Toxicité humaine (C)			
locale	Ecotoxicité en eaux douces			

Rappel de la grille de comparaison des impacts :



3.4.3.4.4. L'autoconsommation de l'électricité produite

La sensibilité à l'autoconsommation de l'électricité produite a été testée pour les trois scénarios du CFPPA. Les résultats montrent de très fortes sensibilités et des évolutions distinctes selon les scénarios (voir Figure 37). Cette disparité s'explique par le fait que l'autoconsommation va supprimer l'impact lié au mix électrique et spécifiquement au charbon, mais va au contraire accentuer les impacts relatifs à l'exploitation et à la mobilisation de la biomasse. En effet, pour produire une même quantité d'électricité, il faudra davantage de biomasse afin d'assurer la production supplémentaire liée à la consommation électrique de la plateforme. Ainsi, les impacts liés aux activités d'exploitation de la biomasse, comme les pertes de carbone suite à l'exploitation des peuplements d'*Acacia mearnsii* seront accentués, ce qui explique l'augmentation de 44% de l'impact sur le changement climatique. Egalement, l'impact sur la destruction de la couche d'ozone, qui pour l'Acacia était provoqué par l'utilisation d'équipements forestiers, montre une variation positive (+23%), alors qu'elle est négative pour les deux autres scénarios (-14 et 25%). Les variations les plus marquées concernent le bois de palette pour lequel les impacts ou les bénéfices sont fortement accentués : émissions de particules (-105 %), formation d'ozone photochimique (-106%), acidification (-186%), eutrophisation terrestre (-333%), eutrophisation en eaux douces (-105%). Ces variations sont relatives au fait que les quantités de palettes non brûlées augmentent, et donc les impacts évités pour ces différents indicateurs.

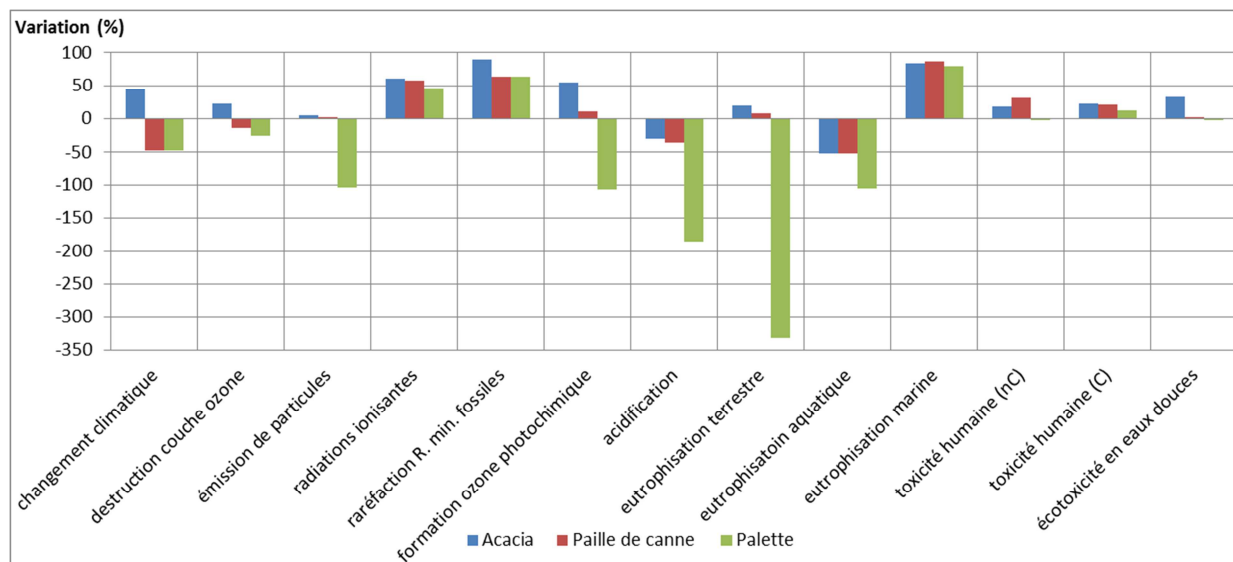


FIGURE 37 : EVOLUTION DES INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX AVEC AUTOCONSOMMATION DE L'ELECTRICITE PRODUITE

D'un point de vu global, ces résultats sont à modérer puisque pour une quantité fixe de biomasse à valoriser, la production d'électricité sera réduite. Ainsi, dans le scénario de base, la quantité d'électricité provenant du mix correspond à la quantité d'électricité qui ne sera pas autoconsommée dans le scénario d'autoconsommation. Il n'y aurait donc aucun intérêt économique et environnemental global à auto consommer l'électricité produite. Seule l'absence des pertes en ligne (10,9%) pour l'électricité consommée sur la plateforme dans le cas de l'autoconsommation induit un réel bénéfice environnemental global.

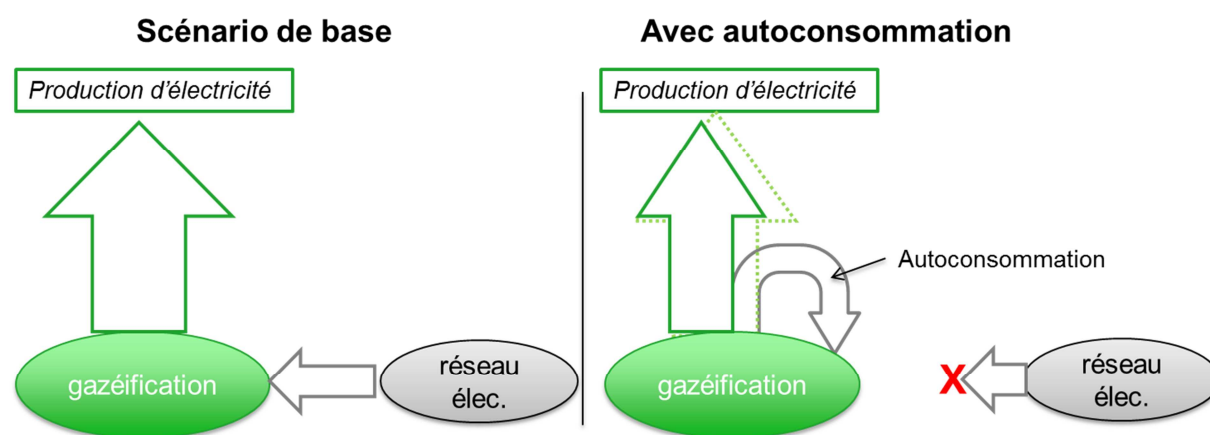


FIGURE 38: COMPARAISON DES FLUX GLOBAUX D'ELECTRICITE AVEC OU SANS AUTOCONSOMMATION DE L'ELECTRICITE PRODUITE.

3.4.3.5. Résultats de l'ACV de la canne fibre

En absence de vision prospective de la production de canne fibre à La Réunion, l'Analyse de Cycle de Vie est menée selon une méthode ne permettant pas d'inclure les conséquences de l'utilisation de la biomasse. Ainsi, l'ensemble des émissions liées aux activités réalisées depuis la préparation des parcelles, la production agricole, jusqu'à la production d'électricité ont été comptabilisées.

3.4.3.5.1. Analyses de contribution

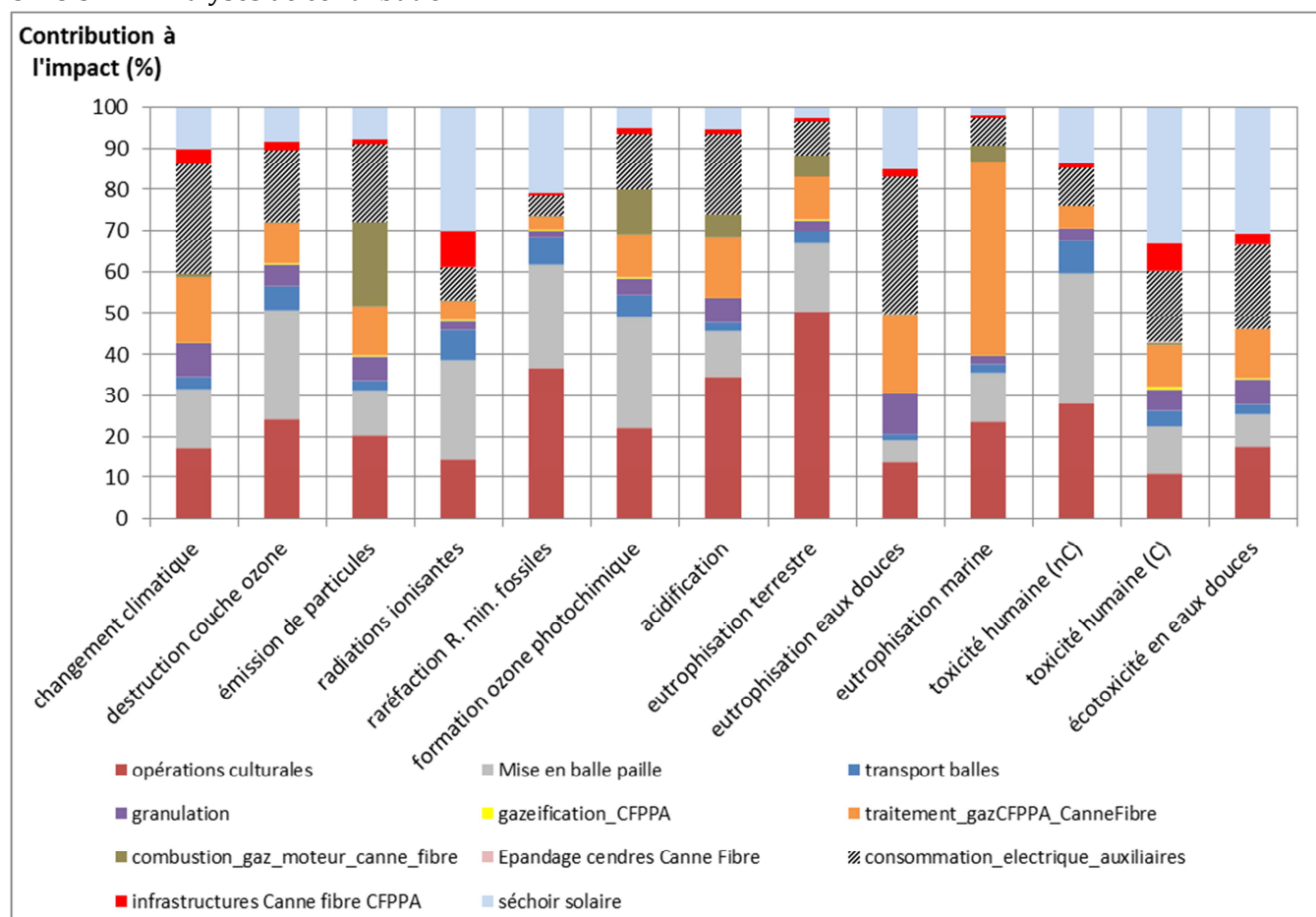


FIGURE 39 : DIAGRAMME DE CONTRIBUTION AUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR LE SCENARIO "CANNE FIBRE CFPPA" (METHODE ILCD 2011, MIDPOINT)

3.4.3.5.1.1. Effets sur le changement climatique

L'impact sur le changement climatique est causé à 26% par la consommation électrique (et principalement par les impacts de l'électricité issue du charbon), à 17% par les opérations culturales (principalement par l'activité de récolte), à 17 % par le traitement des gaz (et par la consommation électrique du groupe froid de la plateforme de gazéification), et enfin à 14% par l'activité de mise en balle (équipement)

3.4.3.5.1.2. Destruction de la couche d'ozone

La destruction de la couche d'ozone est provoquée à contribution similaires par l'activité de mise en balle de la canne fibre (26%, principalement par la consommation de carburant diesel), et par les opérations culturales (24%, principalement par les activités de récolte avec la consommation de carburant diesel). Puis dans une moindre mesure par la consommation électrique de la plateforme (17%) et par l'étape de traitement des gaz (11%, principalement par la consommation électrique du groupe froid).

3.4.3.5.1.3. Emissions de particules

Les émissions de particules sont provoquées à parts sensiblement égales par la combustion du syngaz dans le moteur (20%), par les opérations culturales (20%, principalement les émissions de l'équipement utilisé pour la récolte), par la consommation électrique de la plateforme (19%) ; puis par le traitement des gaz (12%), et par l'activité de mise en balle (11%, émissions de la presse).

3.4.3.5.1.4. Effet des radiations ionisantes sur la santé humaine

Les radiations ionisantes sont émises à 30% par le séchoir solaire, à 24% par l'opération de mise en balle et à 14% opérations culturales. L'ensemble de ces impacts est lié aux étapes de production de ces équipements dans des pays où le mix électrique repose en partie sur de l'énergie nucléaire.

3.4.3.5.1.5. Epuisement des ressources minérales et fossiles

La raréfaction des ressources concerne presque exclusivement les ressources minérales (99% de l'impact) et très peu les ressources fossiles. L'épuisement des ressources minérales est causé à 37% par les opérations culturales, à 25% par les activités de mise en balle et à 21% par le séchoir solaire. Ces impacts sont liés aux ressources minérales utilisées pour la construction des équipements (coupeuse, presse, séchoir solaire).

3.4.3.5.1.6. Formation d'ozone photochimique

La formation d'ozone photochimique est provoquée à 27% par les activités de mise en balle, à 22% par les opérations culturales (récolte, carburants), à 13% par la consommation électrique de la plateforme et à 11% par la combustion du syngaz dans moteur et pour le traitement des gaz

3.4.3.5.1.7. Acidification

L'acidification est provoquée à 34% par les opérations culturales, à 19% par la consommation électrique de la plateforme, à 15 % par le traitement gaz (consommation électrique et émissions du traitement des condensats en STEP), à 11% par les activités de mise en balle. Les impacts relatifs aux opérations culturales sont liés aux émissions agricoles issues de l'apport de fertilisants minéraux (NH_3) et aux émissions lors de l'étape de récolte (NO_x et SO_2).

3.4.3.5.1.8. Eutrophisation terrestre

L'eutrophisation terrestre est provoquée à 50% par les opérations culturales (émissions agricoles de NH_3 dues à l'application de fertilisants minéraux et émissions de carburants lors de la récolte), à 16% par les activités de mise en balle (émissions carburants) et à 11% par le traitement des gaz.

3.4.3.5.1.9. Eutrophisation en eaux douces

L'eutrophisation en eaux douces est provoquée à 33% par la consommation électrique de la plateforme (lié aux activités d'extraction du charbon), à 20% par le traitement des gaz, à 14% par le séchoir solaire et à 13% par les opérations culturales (émissions phosphate au champ par les fertilisants minéraux).

3.4.3.5.1.10. Eutrophisation marine

L'eutrophisation marine est provoquée à 47% par le traitement des gaz (NH_4^+ issu du traitement des condensats en STEP), à 23% par les opérations culturales (émissions agricoles de NO_3^- , NO_x liées principalement à l'utilisation de fertilisants minéraux).

3.4.3.5.1.11. Toxicité humaine non cancérogène

La toxicité humaine non cancérogène est provoquée à 31% par les activités de mise en balle (émission de zinc au champ liée à l'usure des pneus), à 28% par les opérations culturales (émissions de zinc) et à 13% par le séchoir solaire (émissions de cuivre pour la construction de la plaque thermique).

De façon similaire aux autres scénarios, en excluant les métaux, les émissions sont principalement liées à l'utilisation d'un herbicide pour la production de canne à sucre, dont les bagasses intègrent le mix électrique.

3.4.3.5.1.12. Toxicité humaine cancérigène

La toxicité humaine cancérigène est causée à 33% par le séchoir solaire (utilisation de chrome et d'aluminium pour la plaque thermique), à 17% par la consommation d'électricité de la plateforme et à contribution similaire de 11% pour les opérations culturales, la mise en balle et le traitement du gaz.

En excluant les métaux, comme pour les autres scénarios les émissions sont principalement liées à l'utilisation d'un herbicide pour l'électricité produite à partir de bagasse de canne à sucre et de formaldéhyde pour l'électricité produite à partir de fioul. Les émissions liées aux produits phytosanitaires utilisés par la culture de la canne fibre ne représentent qu'une très faible part de l'impact (< 4%).

3.4.3.5.1.13. Ecotoxicité en eaux douces

L'écotoxicité en eaux douces est causée à 30% par le séchoir solaire (traitement de fin de vie du cuivre utilisé dans la plaque thermique), à 20% par la consommation électrique de la plateforme et à 17% par les opérations culturales (herbicides).

En excluant les métaux, les émissions sont principalement liées à l'utilisation d'un herbicide, le métolachlor pour la production de la canne fibre.

3.4.3.5.1.14. Synthèse des impacts environnementaux du scénario Canne Fibre CFPPA

Les étapes du scénario canne fibre qui contribuent le plus aux impacts environnementaux sont celles de la production agricole, de la mise en balle et de la consommation électrique de la plateforme. La forte contribution de la production agricole s'explique par l'utilisation d'équipements lourds notamment pour la récolte (émetteurs de GES, de particules, de substances émettrice d'ozone photochimique, utilisatrices de ressources minérales, etc.), par l'utilisation d'engrais de synthèse (impacts sur l'acidification, l'eutrophisation, l'écotoxicité en eaux douces) et de façon plus marginale par l'application de produits phytosanitaires (impacts sur la toxicité humaine et des écosystèmes). La forte contribution de la consommation électrique de la plateforme et du groupe froid s'explique comme pour les scénarios Acacia, Palette et Paille de canne, par la composition du mix électrique, où la production d'électricité à partir de charbon est responsable de nombreux impacts (émission de GES, émission de particules, acidification, eutrophisation en eaux douces, etc.).

3.4.3.5.2. Comparaison au charbon et au mix électrique

En reprenant la grille de comparaison des impacts de l'électricité issue de la canne fibre par rapport aux impacts du charbon, il apparaît que la canne fibre est classée comme « nettement plus polluante » que le charbon sur les indicateurs de destruction de la couche d'ozone et de raréfaction des ressources minérales et fossiles, ainsi que pour les radiations ionisantes et l'eutrophisation marine, et classée comme « plus polluante » pour l'eutrophisation terrestre. En revanche, la canne fibre est classée comme « nettement moins polluante » sur l'indicateur de changement climatique (réduction de 41% des GES) et classée comme « moins polluante » sur l'eutrophisation en eaux douces. Sur les autres indicateurs (acidification, émission de particules, formation d'ozone photochimique, toxicité humaine et des écosystèmes), les impacts sont classés comme similaires.

Par rapport au mix électrique, la canne fibre apparaît comme « nettement plus polluante » sur les indicateurs de destruction de la couche d'ozone, de raréfaction des ressources minérales et fossiles, de radiations ionisantes, d'eutrophisation terrestre et d'eutrophisation marine ; puis comme « plus polluante » sur les indicateurs d'acidification, de formation d'ozone photochimique et de toxicité humaine. Elle est classée comme « similaire » au mix électrique sur l'indicateur de changement climatique, l'eutrophisation en eaux douces, l'émission de particules, la toxicité humaine cancérigène et l'écotoxicité en eaux douces.

TABLEAU 35 : COMPARAISON DES IMPACTS DU SCENARIO CANNE FIBRE CFPPA PAR RAPPORT AUX IMPACTS DE L'ELECTRICITE PRODUITE A PARTIR DU CHARBON ET DE L'ELECTRICITE DU MIX ELECTRIQUE REUNION

Échelle	Impact	Impacts de la production d'électricité par gazéification de canne Fibre par rapport au charbon	Impacts de la production d'électricité par gazéification de canne Fibre par rapport au mix électrique Réunion
Globale	changement climatique	- 42%	+ 3%
Globale	<i>(destruction couche ozone)</i>		
Globale	raréfaction R. min. fossiles		
Régionale	<i>(radiations ionisantes)</i>		
Régionale	acidification		
Régionale	eutrophisation terrestre		
Régionale	eutrophisation eaux douces		
Régionale	eutrophisation marine		
Locale	émission de particules		
Locale	formation ozone photochimique		
Locale	toxicité humaine (nC)		
Locale	toxicité humaine (C)		
Locale	écotoxicité en eaux douces		

Ces résultats s'expliquent principalement par l'utilisation d'équipements agricoles, de produits phytosanitaires et d'engrais. Le scénario Canne Fibre présente moins d'impacts que le charbon sur les indicateurs suivants : changement climatique (niveau d'émission comparable au mix électrique), acidification, eutrophisation en eaux douces, toxicité humaine cancérigène et écotoxicité en eaux douces. Les impacts sont plus faibles que le mix électrique et le charbon sur un seul indicateur : l'eutrophisation en eaux douces.

Ces résultats indiquent que les performances environnementales de la canne fibre sont intéressantes en comparaison du charbon et du mix électrique principalement sur le changement climatique. En revanche, la production agricole a des impacts plus importants sur les indicateurs d'eutrophisation terrestre et marine ainsi que sur la toxicité humaine. Les impacts environnementaux de la canne fibre pourraient être nettement améliorés par la diminution des impacts des activités agricoles, notamment l'utilisation de produits phytosanitaires et d'engrais. A noter que l'itinéraire technique choisit se conforme à celui de la canne à sucre produite à la Réunion. Des travaux de recherche sont en cours au CIRAD et à ErCane afin d'améliorer les connaissances agronomiques sur le comportement de ces variétés et permettraient à terme de réduire l'usage de fertilisants minéraux et de produits phytosanitaires.

Conclusion

Un potentiel mobilisable d'intérêt pour quelques biomasses ligneuses :

L'évaluation de la disponibilité en biomasse pour une valorisation par gazéification montre que les potentiels théoriques, disponibles et mobilisables sont très élevés pour trois biomasses : le bois d'*Acacia mearnsii* (5 645 tMS/an), le bois de palette (6 560 tMS/an) et la paille de canne à sucre (38 539 tMS/an).

Ces potentiels rendent compte des contraintes naturelles, légales et techniques de mobilisation. Ils ne prennent pas en compte les aspects sociaux et politiques pouvant freiner leur réalisation. Concernant le bois d'*Acacia*, le manque d'acteurs qualifiés pour l'exploitation du bois par exemple est certainement un frein majeur à la mobilisation de cette ressource. Pour la paille de canne, les résistances relevées chez les planteurs à vendre leur paille peut également réduire fortement le potentiel mobilisable. Ces deux éléments devront faire l'objet d'un accompagnement spécifique si ces biomasses sont retenues comme priorité.

Les biomasses issues du traitement des déchets verts ou de la taille des manguiers à l'échelle régionale présentent des potentiels nettement plus faibles (respectivement 50 et 342 tMS/an). Au niveau des biomasses produites par le lycée agricole de St Paul, le bois de taille des manguiers et des haies ne permettent pas de subvenir aux besoins de fonctionnement de la plateforme de gazéification pour une durée de 6 000h/an. D'autres biomasses non produites actuellement à la Réunion et issues de cultures dédiées à l'énergie, présentent des potentiels théoriques et disponibles importants : il s'agit du bois d'eucalyptus et de la canne fibre. Cependant, le manque d'éléments permettant de poser des hypothèses prospectives quant à leur localisation (effets potentiels de substitution ou de complémentarité) n'ont pas permis d'aboutir à l'évaluation de leur potentiel mobilisable. Cependant, compte tenu de l'intérêt porté sur la canne fibre et des essais agronomiques en cours, des scénarios spécifiques à cette biomasse ont été évalués afin d'enrichir les réflexions sur l'avenir de cette production.

Des scénarios de gazéification qui répondent à des objectifs distincts :

Les scénarios de valorisation énergétique des biomasses par gazéification répondent à de multiples objectifs qui couvrent les dimensions économiques, sociales et environnementales. A l'échelle de la plateforme du CFPPA, ces objectifs ont été identifiés et hiérarchisés par les partenaires du projet. A l'échelle de la Région, un panel d'objectifs a été identifié. Les scénarios sélectionnés visent à répondre à ces différents objectifs (Tableau 36).

A l'échelle du CFPPA, les biomasses retenues sont les suivantes : bois d'*Acacia* ; bois de palette ; paille de canne à sucre et canne fibre. Les deux premières sont fortement disponibles et la gazéification est bien maîtrisée pour ce type de biomasse-bois. Intégrées dans des scénarios de production d'électricité, elles répondent principalement aux objectifs d'expérimentation, de démonstration et de production. Les deux dernières sont produites sur le site du CFPPA et leur comportement thermochimique est peu renseigné. Elles répondent au mieux aux objectifs pédagogiques et d'expérimentation.

Au niveau régional, deux types de filières ont été retenus, permettant de répondre à une combinaison d'objectifs. Le premier concerne la valorisation du bois d'*Acacia* dans de petites unités de gazéification (100 kWé) situées dans les Hauts de l'île et en bout de ligne haute tension et répond aux objectifs b, c et e. Le second concerne la valorisation du bois palette dans des unités de moyenne capacité (500 kWé), situées à proximité des sites industriels de l'île et répond aux objectifs a, c et d.

TABLEAU 36 : OBJECTIFS ET SCENARIOS SELECTIONNES

Echelle CFPPA		Echelle Région	
Objectif hiérarchisés	Biomasse retenues	Panel d'objectifs	Scénario (biomasse/localisation/ puissance installée)
1/ expérimentation	Bois d'Acacia Palette Paille de canne Canne fibre	a. augmentation de la part d'EnR dans le mix électrique de l'île	Palette/Bas/500 kWé
2/ pédagogique	Paille de canne Canne fibre	b. autonomie énergétique des territoires	Acacia / Hauts de l'Ouest / 100 kWé
3/démonstration	Bois d'Acacia Palette	c. développement économique des territoires	Acacia / Hauts de l'Ouest / 100 kWé Palette/Bas/500 kWé
4/ production d'électricité	Bois d'Acacia Palette	d. traitement des déchets	Palette/Bas/500 kWé
		e. émergence d'une filière bois-énergie	Acacia / Hauts de l'Ouest / 100 kWé

Des coûts de production élevés dans un contexte de tarification réglementaire changeant :

L'analyse économique des scénarios du CFPPA a été réalisée à titre d'information, bien que la configuration de la plateforme (faible puissance installée et durée de fonctionnement, investissements ciblés pour l'expérimentation) ne permette pas de répondre à un objectif de rentabilité économique. Les résultats montrent que les coûts de production sont élevés : 427 à 602 €/MWh pour une durée de fonctionnement de 1 880h/an. La valorisation du bois palette est la solution la moins coûteuse, du fait du faible prix d'achat de la biomasse (20 €/tMB), contrairement au bois d'Acacia dont le prix d'achat est le plus important (52,2 €/tMB). Les scénarios canne fibre présentent le coût de production le plus élevé du fait du prix d'achat de la biomasse (50 €/tMB), calculé de façon à maintenir une marge brute à l'hectare identique à celle de la canne à sucre et du taux d'humidité élevé de la biomasse brute après récolte (68 % d'humidité ; soit 156 €/tMS). Les scénarios sur l'Acacia et la paille de canne présentent des coûts de production similaires. Les analyses de sensibilité ont montré que le coût de production est fortement impacté par la durée de fonctionnement ; il est réduit d'un facteur 2 lorsque l'on passe de 1 880h à 6 000h/an. En revanche, et d'après les hypothèses posées, la puissance installée a peu d'influence sur le coût de production dès lors qu'elle est supérieure à 100 kWé. Ces résultats montrent que dans un objectif de réduire le coût de production de l'électricité, la durée de fonctionnement est un paramètre essentiel.

Au niveau des scénarios à l'échelle régionale, la localisation des unités de gazéification a été choisie de façon à minimiser les coûts de transport et donc à rapprocher les lieux de production de la biomasse et le lieu de sa valorisation énergétique. Deux sous-scénarios Acacia région ont été évalués : à Petite France et à Notre Dame de la Paix pour des unités de 100 kWé. Le coût de transport varie légèrement compte tenu du réseau routier et de la proximité des peuplements d'Acacia (1,44 à 4,3 €/tMS). Pour le scénario Palette, le site du Port a été retenu pour l'évaluation économique, avec une unité de moyenne capacité de 500 kWé. Les coûts de production sont plus faibles que pour les scénarios du CFPPA, avec 215 et 178 €/MWh respectivement pour l'Acacia à Petite France et pour le scénario Palette avec un niveau de subvention à l'investissement de 50%. La baisse du coût de production pour les scénarios régionaux est principalement due au coût d'investissement qui a été réduit de façon à être représentatif d'un investissement privé, à la consommation électrique des auxiliaires et au coût de transport de la biomasse. A nouveau, le prix d'achat de la biomasse (pour le bois d'Acacia principalement) et les charges de personnels représentent les postes de dépense les plus importants dans le coût de production.

Il en résulte qu'aucun des scénarios évalués pour la plateforme du CFPPA ou à l'échelle régionale n'atteint le prix d'achat actuellement fixé pour la combustion de la biomasse (43,4 €/MWh) ou revalorisé (96 €/MWh). Cela signifie qu'actuellement aucune installation privée avec un objectif de rentabilité ne pourrait être installée si les tarifs d'achat ne sont pas réévalués à la hausse et établis de façon spécifique à la gazéification. Il convient de signaler une évolution récente de la réglementation pour les Zones Non Interconnectées qui permet d'établir les tarifs de rachat de l'électricité par contrat de gré à gré avec EDF et la CRE (commission de régulation de l'énergie). Celle-ci offre la possibilité d'augmenter considérablement les tarifs de gazéification et permettrait d'atteindre la rentabilité économique des scénarios Région évalués. Du point de vue de la comptabilité nationale, les installations de gazéification peuvent contribuer à diminuer les surcoûts financés par la CSPE (contribution au service public de l'électricité), liés à la péréquation tarifaire³⁶. En 2013, l'ensemble des surcoûts financés par la CSPE s'élèvent à 410 M€ pour l'île de la Réunion. Le surcoût lié au rachat de l'électricité serait moindre pour la gazéification comparé aux technologies dont les coûts de production sont plus élevés, comme l'électricité thermique par exemple. A titre de comparaison, le coût moyen de production à la Réunion toutes technologies confondues est de 206 €/MWh (CRE 2014)³⁷. Le développement de la gazéification en substitution de l'électricité thermique permettrait alors de réduire les dépenses de l'Etat dans le cadre de la CSPE.

Des impacts environnementaux globalement moindres que le mix électrique réunionnais

Les analyses environnementales réalisées par ACV avaient un double objectif : pouvoir évaluer l'impact environnemental de chacun des scénarios par rapport à la situation actuelle d'utilisation de la biomasse (scénarios de référence) et par rapport à deux scénarios énergétiques : le mix électrique réunionnais actuel et la production d'électricité à partir de charbon. Au même titre que l'analyse économique, l'analyse environnementale des scénarios à l'échelle du CFPPA n'a été réalisée qu'à titre indicatif.

Les résultats montrent que le scénario Palette présente de meilleures performances environnementales que les autres, aux deux échelles d'analyse. Pour le scénario d'échelle régionale, les impacts sont nettement moins polluants que le mix électrique actuel de l'île au niveau du changement climatique, de l'eutrophisation terrestre, de l'émission de particules et de la formation d'ozone photochimique.

L'Acacia présente des résultats plus contrastés : l'impact de la mobilisation de cette ressource sur le changement climatique est important. Il est plus élevé que l'emploi du charbon et du mix électrique à l'échelle du CFPPA et plus élevé que le mix électrique pour l'échelle Région.

Cependant, cette importance relative doit être considérée avec précaution. D'une part car les incertitudes concernant le charbon et le mix électrique tendent à sous-estimer leur impact sur le changement climatique ; et d'autre part car le devenir en l'état de ces peuplements est également incertain rendant ainsi le scénario de référence (maintien des peuplements matures) peu crédible à moyen terme. Enfin, les bénéfices environnementaux attendus de la lutte contre une espèce envahissante ne sont pas des indicateurs renseignés par les ACV. Ces éléments invitent donc à considérer les impacts environnementaux de l'Acacia avec prudence et à ne pas exclure la valorisation énergétique de cette

³⁶ « La péréquation tarifaire permet aux consommateurs des ZNI de bénéficier des tarifs réglementés de vente applicables en métropole continentale. Cependant, les coûts de production de l'électricité dans ces zones sont en moyenne, pour l'année 2013, presque cinq fois supérieurs à la part énergie de ces tarifs – représentative des coûts de production comptables d'EDF – occasionnant pour les opérateurs historiques, EDF Systèmes énergétiques insulaires (EDF SEI) et Electricité de Mayotte (EDM), des surcoûts qui font l'objet d'une compensation par la CSPE. » (Commission de Régulation de l'Energie 2014)

³⁷ D'après la CRE, seulement deux sources d'énergies produites à la Réunion présentent des coûts de production plus élevés que la gazéification : le solaire (474 €/MWh) et l'achat d'énergie thermique à un opérateur tiers (377 €/MWh) (voir Annexe 8). A noter que les coûts de production issus des centrales thermiques (fusionnés avec l'hydroélectrique dans le document de la CRE) sont probablement plus élevés que ceux des scénarios de gazéification de cette étude, en témoigne le surcoût de la centrale du Port Est de la Réunion évalué à 335 €/MWh en 2013 suite aux récents investissements (CRE 2014).

biomasse sur la seule base de ces résultats. L'ACV de ce type de filière pourra être approfondi après une réflexion plus globale sur le devenir de cette espèce invasive sur l'île de la Réunion.

Pour les deux scénarios à l'échelle régionale (Acacia et Palette), les avantages environnementaux s'accroissent, particulièrement sur le changement climatique, l'acidification et l'eutrophisation terrestre. Les scénarios de l'échelle régionale étant ceux qui ont pour vocation à être développés, l'intégration de telles filières en substitution du charbon permettraient alors de diminuer certains impacts environnementaux et d'en maintenir d'autres aux niveaux actuels³⁸.

Le scénario Paille de canne (uniquement étudié à l'échelle du CFPPA) présente des résultats intermédiaires. Il présente un impact nettement moins polluant que le charbon ou que le mix électrique sur le changement climatique. Les performances environnementales sont meilleures que le charbon sur l'acidification et l'eutrophisation et sont meilleures ou similaires au mix électrique sur ces mêmes indicateurs. De plus, les performances sont similaires au charbon et au mix électrique sur les indicateurs de toxicité humaine et des écosystèmes, d'émission de particules ou de formation d'ozone photochimique.

Enfin, le scénario canne fibre n'a pas fait l'objet d'une analyse similaire en raison du manque de connaissances et d'éléments prospectifs permettant d'intégrer les effets du développement de cette culture sur les territoires. Néanmoins à l'échelle du CFPPA, les résultats montrent que les impacts sur le changement climatique sont meilleurs que le charbon et similaires au mix électrique. En revanche, le scénario est évalué comme plus polluant concernant l'eutrophisation terrestre et marine. Il est également évalué comme plus polluant que le mix électrique concernant la toxicité non cancérogène et la formation d'ozone photochimique. Les résultats montrent que les impacts environnementaux sont principalement liés aux activités agricoles, notamment du fait de la récolte et de l'utilisation d'intrants (fertilisation minérale et produits phytosanitaires)³⁹. L'itinéraire technique est néanmoins source de nombreuses incertitudes et fait actuellement l'objet de travaux de recherche visant à réduire les intrants tout en améliorant les rendements en fibre. Ces résultats doivent donc être observés avec précaution et ne sont pas représentatifs des performances potentielles de cette filière.

Limites des analyses réalisées et prolongements nécessaires

Finalement, les analyses réalisées ont permis d'identifier un potentiel disponible et mobilisable non négligeable et des coûts de production des scénarios à l'échelle régionale de 178 à 215 €/MWh, de l'ordre du coût de production du mix électrique réunionnais. Toujours à cette échelle, l'analyse environnementale montre une réduction globale des impacts environnementaux par rapport à ceux du charbon ou du mix électrique ; mais doivent être considérés avec prudence au niveau du changement climatique notamment.

Il convient de rappeler que ces analyses ne couvrent pas tous les impacts, avantages et inconvénients de ces systèmes de gazéification ; d'un point de vue technique, environnemental, économique et social.

Au niveau technique, la gazéification peut contribuer à réduire certaines contraintes des gestionnaires de réseau électrique car c'est une source d'énergie renouvelable non intermittente, contrairement au photovoltaïque ou à l'éolien et de production stable contrairement à l'hydroélectrique. Cette technologie offre donc une production sécurisée.

³⁸ à l'exception du prélèvement sur les ressources minérales et fossiles, mais dont la modélisation proposée par l'ILCD est discutable.

³⁹ A noter que le projet SYPECAR identifie des sources d'impacts similaires pour la combustion de la canne fibre dans des unités de 5 ou 10 MW (Masson 2015). Les scénarios construits, le type de valorisation énergétique, ainsi que la méthode de modélisation des impacts (ReCiPe) utilisée sont distincts ; ce qui limite les comparaisons.

Au niveau de l'évaluation environnementale, la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie utilisée offre l'avantage de prendre en compte l'ensemble des impacts environnement depuis la mobilisation de la biomasse jusqu'à la production d'électricité. En revanche, faute de données spécifiques à l'île de la Réunion ou aux produits et processus utilisés, certaines données sont issues de bases de données internationales, d'hypothèses ou de modélisation. Les analyses de sensibilité ont montré que certains indicateurs, comme le changement climatique y sont assez sensibles. Une évaluation environnementale d'impacts locaux, focalisée sur certains indicateurs permettrait de compléter l'analyse à l'aide de mesures locales au niveau des étapes de prélèvement de la biomasse ou du fonctionnement de la plateforme. Cette méthode d'évaluation ne permet toutefois pas d'intégrer l'ensemble des impacts du cycle de vie et ne prend en compte que les émissions directes.

Enfin, la valorisation de ressources forestières, de déchets ou de résidus agricoles, sans porter atteinte aux usages actuels qui en sont faits par d'autres acteurs, peut être source de développement économique et territorial. Une analyse complémentaire des impacts en termes de création de valeur (économique), de création d'emplois, d'impacts écologiques (pour la lutte contre l'expansion de *l'Acacia mearnsii*) permettrait d'enrichir ces résultats et d'accompagner au mieux le développement de ces filières.

Bibliographie

- ADEME. 2014. « Etude sur la valorisation des cendres de biomasse en forêt 2011-2013 ».
- ADIR, ADEME, METAL Réunion, et CTBR. 2008. « Présentation et remise du rapport de synthèse « Etude de faisabilité d'une filière bois énergie à partir des bois de palette » ».
- Agreste La Réunion. 2013. « Panorama des industries agroalimentaires à La Réunion ». Daaf La Réunion.
- ANSES. 2015. « Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la demande d'homologation du produit Cendre de bagasse Albioma Le Gol, à base de cendres de bagasse de canne à sucre de la société Albioma Le Gol (île de la Réunion) ». Anses, dossier n°2014-0063. Maisons-Alfort: ANSES.
- CER Réunion. 2012. « Analyse de groupe, campagne sucrière 2011; Canne à sucre ». Saint André, Réunion: CER FRANCE Réunion.
- Cerri, C. C., M. V. Galdos, S. M. F. Maia, M. Bernoux, B. J. Feigl, D. Powlson, et C. E. P. Cerri. 2011. « Effect of Sugarcane Harvesting Systems on Soil Carbon Stocks in Brazil: An Examination of Existing Data ». *European Journal of Soil Science* 62 (1): 23-28. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01315.x.
- Chabalier, Pierre-François, Virginie Van de Kerchove, et Hervé Saint Macary. 2006. « Guide de la fertilisation organique à La Réunion ». CIRAD, Chambre d'Agriculture de la Réunion.
- Chataigner, Christine, et Olivier Barge. 2004. « Un SIG pour l'analyse des approvisionnements : l'exemple de l'obsidienne en Arménie ». *Revue d'Archéométrie* 28 (1): 25-33. doi:10.3406/arsci.2004.1059.
- Choisis, Jean-Philippe, P. Grimaud, et C. Lassalle. 2009. « Pratiques d'élevage dans les exploitations bovines allaitantes conduites sur pâturage dans les Hauts de la Réunion ». *Inra Prod. Anim.* 22 (4): 345-54.
- CIBE. 2014. « Sortie de Statut de Déchet des broyats d'emballages en bois pour un usage comme combustible dans les installations de combustion classées 2910-A ; Note d'information ». Comité Interprofessionnel du Bois-Energie.
- Commission de Régulation de l'Energie. 2014. « La contribution au service public de l'électricité (CSPE) : mécanisme, historique et prospective ».
- Conseil Général de la Réunion. 2015. « Projet de Plan de Prévention et de Gestion des Déchets Non Dangereux Département de La Réunion ». Conseil Général de la Réunion, Safège,.
- CRE. 2014. « La contribution au service public de l'électricité (CSPE) : mécanisme, historique et prospective ». Commission de régulation de l'énergie.
- CYATHEA. 2003. « Vocations des terrains non mis en valeur dans les zones de mi-pente : une place pour la forêt? Itinéraires technico-économiques possibles sur les terrains à vocation "forêt de production" ». Conseil Régional, CYATHEA.
- DAAF Réunion. 2010. « Guide des bonnes pratiques agricoles à la Réunion ». Saint André, Réunion: DAAF Réunion.
- Deleuze, Nathalie, Vincent Boulanger, Laurent Augusto, et Capucine Dupont. 2012. « Le retour des cendres de bois en forêt : opportunités et limites ». ONF, RDV techniques n°35.
- Energie Réunion SPL, et OER. 2015. « Bilan énergétique, île de La Réunion 2014 ». édition 2015. Energie Réunion SPL.
- Energy research Centre of the Netherlands. 2012. « Phyllis 2 ; Database for biomass and waste ». e EU 7th Framework Programme ; Brisk Project. <https://www.ecn.nl/phyllis2>.
- European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2011. « International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. » EUR 24571 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.
- FCBA, et ADEME. 2008. « Référentiel combustible bois énergie : les connexes des industries du bois ; définition et exigences ». ADEME.
- Fillols, Emilie, et Pierre-François Chabalier. 2007. « Guide de la fertilisation de la canne à sucre à la Réunion ». Saint Denis, Réunion: CIRAD, CTICS.
- Fusilier, Jean-Louis, et Jean-Philippe Choisis. 2006. « Le modèle d'exploitation agricole familiale réunionnais face à l'accroissement des contraintes foncières et économiques ». *Cahiers Agricultures* 15 (6): 542-48.

- Guerrere, Vincent, et Fanny Miss. 2014. « Note technique N°2 : réglementation applicable aux cendres ». projet A.B..Cendres. SIMA-PECAT.
- Hassoun, P., Jean-Marie Paillat, et P. Brunschwig. 2000. « Les ressources fourragères extérieures à l'exploitation ». In *L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche*, édité par Gilles Mandret, P. Hassoun, Jean-Marie Paillat, et Emmanuel Tillard, CIRAD, 209-23. Repères.
- Hauville, Caroline. 2005. « Cartographie de l'évolution de l'occupation des sols par l'Acacia mearnsii ; accessibilité des parcelles et mobilisation de la ressource ». Rapport de stage de Master 2-DESS de cartographie SIG. Ecole Nationale des Sciences Géographiques, CIRAD UMR PVBMT, Région Réunion.
- IEA. 2010. « Projected costs of generating electricity ». International energy Agency, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- IFN, FCBA, et SOLAGRO. 2009. « biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020 ». ADEME, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. <http://www.dispo-boisenergie.fr/general/accueil>.
- Inddigo. 2014. « Salon bois energie 2014 ; atelier "Sortie de statut de déchet du bois d'emballage" ». Consortium AMORCE/CIBE/SER-FBE/FEDENE/FEDEREC/FNB, mars 13.
- INERIS, LCME, CITEPA, et CSTB. 2008. « Évaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur ». Rapport d'étude DRC-08-70801-15219A. ADEME, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche.
- INRA. 2002. « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? » Expertise scientifique collective. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.
- IPCC. 2006. « Agriculture, forestry and other Land Use ». In *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Vol. vol 4. Japan: IGES.
- IRENA. 2012. « Renewable energy technologies : cost analysis series ; Biomasse for power generation ». IRENA Working paper. Volume 1 : power sector ; issue 1/5. International renewable energy agency.
- Jaglale, Vanessa. 2003. « Estimation des résidus de récolte de la canne à sucre à la Réunion ». Rapport de stage Assistant Ingénieur. Cirad, Institut Supérieur d'Agriculture de Lille.
- Jolliet, Olivier, Myriam Saadé, Pierre Crettaz, Gabrielle Soucy, et Grégory Houillon. 2010. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Koch, Peter, et Thibault Salou. 2015. « AGRIBALYSE : Rapport méthodologique, Version 1.2 ». Angers, France: ADEME.
- Lejars, Caroline, Jean Fusillier, Jean-Marc Blazy, Loïc Guindé, Merle Thomas, Jean-Louis Chopart, et Roland Guichard. 2012. « Une filière canne dédiée à la production électrique peut-elle avoir un intérêt économique et environnemental ? Méthodes et premiers éléments d'analyse en Guadeloupe ». In . Réunion.
- Leppälahti, Jukka, et Tiina Koljonen. 1995. « Nitrogen evolution from coal, peat and wood during gasification : literature review ». *Fuel processing Technology* 43: 1-45.
- Masson, Jérôme. 2015. « Etude de faisabilité d'une unité de production d'électricité par combustion de biomasses issues de cannes fibres à La Réunion ; Analyse des conditions économiques et environnementales ; Etude préliminaire ». Projet SYPECAR ; eRcane, CIRAD, Union Européenne,.
- Nagle, Marcus, Kennedy Habasimbi, Hermann Leis, Busarakorn Mahayothee, Serm Janjai, Methinee Haewsungchaerern, et Joachim Müller. 2007. « Availability and potential of local biomass resources as fuel for drying of tropical fruits in Northern Thailand ». In . University of Göttingen.
- ONF. 2011. « Etudes préalable de mobilisation du bois en zone forestière; PER "développement de filières courtes bois énergie dans les Hauts de l'île" ». Axe 1 : opération 2. Conseil Général de la Réunion, Pôle d'Excellence Rurale.
- Paillat, Jean, Mathilde Mellin, Camille Roussel, et Christophe Poser. 2014. « Projet SYPECAR ; état d'avancement au 30/06/2014 ». ErCane, CIRAD.

- Pouzet, Denis, Aurélie Velle, Hugues Lombard, et Audrey Thong-Chane. 2004. « Amélioration des itinéraires techniques de production de la canne à sucre ; bilan 2003 et perspectives ». Pôle Canne à Sucre Réunion ; Projet 4 « Agronomie et modélisation ». Saint Denis, Réunion: CIRAD.
- Préfet de la Réunion. 2012. *Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales de la Réunion (BCAE). Arrêté préfectoral*.
<https://www.google.com/search?q=n%C2%B03006+relatif+aux+Bonnes+Conditions+Agricoles+et+Environnementales+de+la+R%C3%A9union+%28BCAE%29+Acacia+mearnsii&ie=utf-8&oe=utf-8>.
- Région Réunion. 2011. « Schéma d'aménagement régional de La Réunion ».
- . 2013. « Schéma Régional Climat Air Énergie de La Réunion ». région Réunion, ADEME, Préfecture de la Région Réunion.
- . 2014. « Schéma directeur bois énergie; Mise en place d'une filière bois énergie structurée ». Région Réunion, Cyathea, S3d.
- Rípoli, Tomaz Caetano Cannavam, Molina Jr, Walter Francisco, et Marco Lorenzo Cunali Rípoli. 2000. « Energy potential of sugar cane biomass in Brazil ». *Scientia Agricola* 57 (4): 677-81. doi:10.1590/S0103-90162000000400013.
- Sarrailh, Jean-Michel, et Eric Rivière. 2006. « Bilan des essais effectués sur les essences utilisables comme bois-énergie et ne représentant pas ou peu de risques d'envahissement ». CIRAD, Région Réunion.
- SYPECAR. 2014. « Comité de suivi Sypecar ».
- Tassin, Jacques, et Gérard Balent. 2004. « Le diagnostic d'invasion d'une essence forestière en milieu rural : exemple d'Acacia mearnsii à la Réunion ». *Revue forestière française* 56 (2): 132-42.
- Tassin, Jacques, Haripriya Rangan, et Christian A. Kull. 2012. « Hybrid improved tree fallows: harnessing invasive woody legumes for agroforestry ». *Agroforest Syst* 84: 417-28. doi:10.1007/s10457-012-9493-9.
- Tassin, Jacques, J-N Rivière, M. Cazanove, et E. Bruzzese. 2006. « Ranking of invasive woody plant species for management on Réunion Island ». *Weed Research* 46: 388-403.
- Tricard, Cécile. 2014. « Etat des lieux des connaissances sur la canne "fibre" parmi les cultures "énergétiques" ; revue bibliographique ». Projet SYPECAR ; rapport de stage année de césure ; version provisoire. CIRAD, VetAgroSup.

Glossaire

Foisonnement = réduction du volume réel des stères de bois due aux caractéristiques des bois et/ou du billonnage (billons trop longs, flexueux, mal empilés ou de petit diamètre). Le coefficient de foisonnement correspond au nombre de stères nécessaires pour obtenir 1m³ plein dans le cas de billons de 2m (FCBA 2013).

MAP = mètre cube apparent plaquette; cette unité correspond au volume occupé par 1m³ de bois broyé sous forme de plaquette forestière. Ce volume comprend l'espace occupé par la biomasse y compris les espaces vides entre les plaquettes.

PCI = Pouvoir calorifique inférieur ; représenté la quantité d'énergie (par unité de masse ou de volume) dégagée par un corps lors de sa combustion complète (ADEME 2008).

Plaquettes forestières = combustible obtenu par broyage ou déchiquetage de tout ou partie de végétaux ligneux issus de peuplements forestiers et de plantations n'ayant subi aucune transformation (directement après exploitation) Le terme s'applique également pour le bois d'origine bocagère, issu d'élagage urbain ou de la partie ligneuse des refus de crible issus du compostage de déchets verts (ADEME 2008).

Produit connexe du bois = produits issus de la première transformation du bois, ils correspondent aux résidus de l'exploitation forestière : souches, houppiers, branchages de petit diamètre. Les produits connexes de l'industrie du bois issus de la transformation des grumes ne seront pas pris en compte dans cette étude (écorces, sciures, dosses et délignures, chutes diverses et plaquettes).

Taux de charge d'un moteur = ou appelé « facteur de charge », il correspond au rapport entre l'énergie effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qui aurait été produite si le moteur fonctionnait à sa puissance nominale (c'est-à-dire à 100% de sa charge).

Unités de conversion

1 kWh = 3,6 MJ = 860 kcal

1 tep (tonne équivalent pétrole) = 11 628 kWh = 41 855 MJ

Densité bois : 0,67t/m³

Densité bois bocage : 1 m³ de bois de bocage = 2,7 MAP

Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : Exigences réglementaires pour les installations classées pour l'environnement (ICPE).....	138
Annexe 2 : Consommation électrique des équipements auxiliaires	139
Annexe 3 : Espace de stockage et coûts d'investissements.....	140
Annexe 4 : Aspects réglementaires concernant l'épandage des cendres.....	141
Annexe 5 : Coûts de production détaillés de l'électricité des quatre scénarios CFPPA	142
Annexe 6 : coûts de production détaillés de l'électricité des scénarios Acacia Région	143
Annexe 7 : Coûts de production détaillés de l'électricité du scénario Palette Région.....	144
Annexe 8: Coûts de production des différentes technologies de production d'électricité à la Réunion (CRE 2014)	145
Annexe 9: Composition de la biomasse et des cendres.....	145
Annexe 10: Calcul des émissions agricoles pour la paille de canne et la canne fibre (méthodes Agribalyse et IPCC).....	146
Annexe 11: Pertes de C et émissions agricoles et pour le scénario Paille de canne.....	149
Annexe 12: Données techniques de la production agricole de la canne Fibre	150
Annexe 13: Description des impacts environnementaux	152
Annexe 14: Modélisation des impacts environnementaux du mix électrique.....	153
Annexe 15: Comparaison des impacts des scénarios CFPPA par rapport au mix électrique et au charbon	153
Annexe 16: Comparaison des impacts des scénarios région par rapport au mix électrique et au charbon	154
Annexe 17: Sensibilité à la consommation électrique de l'unité de gazéification.....	155

ANNEXE 1 : EXIGENCES REGLEMENTAIRES POUR LES INSTALLATIONS CLASSEES POUR L'ENVIRONNEMENT (ICPE)

D'après la nouvelle réglementation relative aux installations de combustion en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2014, le bois d'emballage (emballage en bois, bois issus d'installation de gestion des déchets et bois issus de déchets municipaux) ne pourra être utilisé :

- dans les installations de combustion, suivant la rubrique 2910-A sous le régime de déclaration (entre 2 et 20 MW) ou d'autorisation (>20MW) à condition que le combustible ait suivi une procédure de **sortie du statut de déchet** (SSD).
- ou dans les installations de combustion suivant la rubrique 2910-B, sous le régime d'enregistrement (100 kW à 20 MW) ou d'autorisation (>20MW) ;

Tableau a : Classement des installations selon le type de biomasse et la capacité installée

Capacité installée	Modification de l'arrêté depuis 16 octobre 2013, rubrique 2910 : installation de combustion (à l'exclusion des traitements thermiques des déchets 2771 pour les déchets non dangereux et 2770 pour les déchets dangereux)		
	2910-A	2910-B	2910-C
	Gaz naturel, gaz de pétrole liquéfiés, fioul domestique, fioul lourd, charbon Produits végétaux, déchets végétaux, déchets de liège, connexes de scierie, déchets de biomasse ayant fait une SDD (sortie de statut de déchet)	Produits différents de ceux visés en A et C Déchets de biomasse IAA, déchets de pâte vierge, déchets de bois propres, autres déchets ayant fait une SDD	Biogaz issu d'installations de méthanisation
> 20 MW	A	A	Méthanisation sous la rubrique 2781-1
De 2 à 20 MW	D	E	
De 0,1 à 2 MW	/	E	
< 0,1 MW	/	/	/

Régimes de classement en ICPE : D = déclaration ; E = enregistrement ; A = Autorisation

Tableau b: démarches réglementaires et délais selon les régimes ICPE

Régimes ICPE	Démarches à réaliser	Délais
Déclaration (D)	Déclaration à réaliser par l'exploitant avant la mise en service de l'installation auprès de la préfecture Possibilité de prescriptions complémentaires spécifiques Changements notables à signaler Contrôles périodiques à réaliser	3 à 6 mois
Enregistrement (E)	Demande d'enregistrement à la Préfecture réalisée par l'exploitant avant la mise en service Consultation du public en mairie et sur Internet Information des autorités territoriales Possibilité de requalification en autorisation Contrôles périodiques renforcés	6 à 18 mois
Autorisation (A)	Demande d'autorisation Enquête publique Enquête administrative (avis des autorités territoriales et services administratifs) Avis du CODERST Autorisation du fonctionnement par arrêté préfectoral Contrôles périodiques renforcés	12 à 18 mois

ANNEXE 2 : CONSOMMATION ELECTRIQUE DES EQUIPEMENTS AUXILIAIRES

(calculé sur la base d'un fonctionnement de 1 880h/an)

Consommation électrique des auxiliaires, pour une puissance installée de 30 kWé et 1880h/an									
Equipements électriques	Puissance installée kW	taux de charge	Puissance moyenne kW	% temps d'opération	Temps d'opération h/an	Energie moyenne kWh/an	Scénario sans pelletisation	Scénario avec pelletisation	Scénarios région
Broyage biomasse	18,5	70%	13,0	5%	94	1 217	1 217	-	1 217
Fonds mouvants benne1	2,2	70%	1,5	25%	470	724	724	-	-
Fonds mouvants benne2	2,2	70%	1,5	25%	470	724	724	724	724
Automate	2,0	70%	1,4	50%	940	1 316	1 316	1 316	-
Instrumentation / vannes automatiques	1,0	80%	0,8	50%	940	752	752	752	752
Prises / éclairage plateforme	1,0	80%	0,8	10%	188	150	150	150	150
Tapis chargement système gazéification	1,1	70%	0,8	25%	470	362	362	362	362
Crible d'extraction des fines	1,1	10%	0,1	25%	470	52	52	52	52
Vis alimentation réacteur de gazéification	1,1	70%	0,8	100%	1 880	1 448	1 448	1 448	1 448
Vis de sortie des cendres	1,1	70%	0,8	40%	752	579	579	579	-
Ventilateur de tirage	5,5	40%	2,2	100%	1 880	4 136	4 136	4 136	4 136
Ventilateur d'air comburant	3,0	40%	1,2	100%	1 880	2 256	2 256	2 256	2 256
Pompes de refroidissement moteur	2,0	40%	0,8	100%	1 880	1 504	1 504	1 504	1 504
Broyeur à marteaux	6,0	70%	4,2	5%	94	395	-	395	-
Mélangeur	2,0	70%	1,4	5%	94	132	-	132	-
Presse à granulés	3,0	70%	2,1	5%	94	197	-	197	-
Turbine air chaud de séchage solaire	7,0	40%	2,8	20%	376	1 053	1 053	1 053	-
Groupe froid	5,0	70%	3,5	90%	1 692	5 922	5 922	5 922	5 922
TOTAL	67	-	41	-	12,19	22 918	22 194	20 977	17 799
Part d'autoconsommation	-	-	-	-	-	-	39%	37%	32%

Sources : à partir des simulations Bee&Co (2015) et avis d'experts

ANNEXE 3 : ESPACE DE STOCKAGE ET COUTS D'INVESTISSEMENTS

Pour les biomasses à récolte saisonnée, l'approvisionnement en biomasse brute s'effectuera pendant la période de récolte. Pour la canne à sucre, la récolte se répartie entre les mois de juillet à novembre. Pour la canne fibre, la période optimale de récolte selon les cycles de plantation, de culture et de repousse n'est pas déterminée. Le projet SYPECAR a toutefois identifié une fenêtre de faibles rendements entre les mois de juillet et novembre pour les cannes « vierges » (1^{er} année de plantation).

Ces biomasses brutes seront livrées progressivement sur la plateforme pendant la période de récolte, sous forme de balles puis transformées rapidement (séchage, broyage). Les granulés seront stockés en silo. L'espace maximal de stockage nécessaire pour les biomasses brutes et pour les granulés a été calculé de façon à contenir 2/3 de l'espace maximal de stockage des balles de biomasse brute et la totalité de l'espace de stockage du silo. Une surface supplémentaire de 10% a été comptabilisée pour la circulation et la manutention.

Le coût d'investissement est calculé à partir de devis pour des surfaces similaires et fournis par des entreprises réunionnaises : 31 700€ pour un hangar de 200m². Le coût d'investissement a ensuite été rapporté au m² et appliqué à chaque scénario.

	paille canne	paille canne	canne fibre	canne fibre
	1880 h/an	6000h/an	1880 h/an	6000h/an
Quantité de biomasse (tMS)	44,0	140,6	50,0	159,7
Nombre de balles 250kg	176	562	200	639
Encombrement des balles 250 kg, 0,7m ² /t				
espace stockage balles 250 kg	123	394	140	447
masse volumique des granulés bois 0,7t/m ³				
volume silo m ³	63	201	71	228
occupation sol en m ² si silo 3 m de hauteur	21	67	24	76
volume total stockage 2/3 biomasse brute + granulés + 10% circulation	114	362	129	412
coût d'investissement en € (158€/m ² , d'après devis)	17 935	57 239	20 373	65 020

Pour les biomasses exploitées ou fournies toute l'année, l'espace de stockage sur la plateforme est calculé pour un approvisionnement mensuel. Ces biomasses ne nécessitant pas de granulation, seul l'espace de stockage des biomasses brutes est comptabilisé. Le broyage et le séchage s'effectue de façon hebdomadaire afin d'alimenter le gazéifieur en continu et d'éviter une reprise d'humidité sur les broyats secs. L'investissement initial de la plateforme compte un espace de stockage de 50m², supérieure aux besoins mensuels de stockage, aucuns coûts d'investissement supplémentaires ne seront donc comptabilisés.

	palette	palette	Acacia	Acacia
	1880 h/an	6000h/an	1880 h/an	6000h/an
Quantité de biomasse (t MB)	59	189	89,2	284,6
Volume apparent (MAP)	215 kg/m ³		248 t/m ³	
Volume annuel nécessaire (m ³)	110	351	359	1147
Surface annuelle nécessaire pour 3m de hauteur (m ²)	37	117	120	382

Surface de stockage annuelle nécessaire 10% circulation (m ²)	40	129	132	421
Surface de stockage mensuelle nécessaire (m ²)	3	11	11	35

ANNEXE 4 : ASPECTS REGLEMENTAIRES CONCERNANT L'EPANDAGE DES CENDRES

L'épandage des cendres est réglementé par les articles L255-1 à L255-11 du code rural, qui prévoient deux types de démarches selon les matières fertilisantes utilisées.

Les matières considérées comme produits mis sur le marché ou distribués à titre gratuit, sont soumis à homologation, disposent d'une Autorisation Provisoire de Vente (APV), ou répondent aux normes NF (engrais N,P,K amendement organique, amendements minéraux calco-magnésiens ou compost de boues). Les dossiers d'homologation doivent démontrer l'innocuité du produit et l'efficacité agronomique de son épandage. Les cendres de bois ne figurent pas dans la liste NF et ne respectent pas les seuils minimum des engrais végétaux (y compris les cendres de végétaux).

Les produits considérés comme des résidus ou des déchets sous soumis à la réglementation relative aux ICPE. Concernant les chaudières, classées à la rubrique 2910A (combustion de biomasse non adjuvantée), les arrêtés ICPE diffèrent selon la puissance installée.

- Les centrales de puissance inférieure à 2MW ne sont pas soumises à ICPE et dépendent du Règlement Sanitaire Départemental. Leurs déchets sont alors considérés comme des déchets ménagers et doivent être évacués en centre de traitement de déchets non dangereux.
- Pour les installations comprises entre 2 et 20 MW, les cendres peuvent être épandues, dans la limite de 5 000 t/an en respectant les seuils éléments-traces métalliques et de composés-traces organiques et selon le plan d'épandage (arrêté du 28 septembre 2013).
- Pour les installations supérieures à 20 MW, les cendres peuvent être mises sur le marché ou épandues selon un plan d'épandage respectant les mêmes seuils.

Concernant les unités de gazéification envisagées dans cette étude, la démarche d'homologation, plus longue est plus coûteuse, ainsi que la normalisation, ne semblent pas adaptées. La démarche relative aux ICPE sera alors préconisée. En revanche, les puissances installées étant inférieures à 2 MW, l'épandage des cendres n'est pas prévu. Un plan d'épandage validé par arrêté préfectorale permettrait de fournir une alternative pour la valorisation de ce sous-produit au même titre que les cendres issues de la combustion de bagasse de la centrale thermique d'Albioma du Gol, dont le dossier d'homologation a été validé en avril 2015(ANSES 2015).

Sources : (arrêté du 26 août 2013, Guerrere et Miss 2014; ANSES 2015; DAAF Réunion 2010; Deleuze et al. 2012)

ANNEXE 5 : COUTS DE PRODUCTION DETAILLES DE L'ELECTRICITE DES QUATRE SCENARIOS CFPPA

	Scénario 1 : <i>Acacia mearnsii</i>		Scénario 2 : bois de palette		Scénario 3 : paille de canne		Scénario 4 : canne fibre	
Durée de fonctionnement	1 880 h/an	6 000 h/an	1 880 h/an	6 000 h/an	1 880 h/an	6 000 h/an	1 880 h/an	6 000 h/an
Charges fixes								
Coûts d'investissement plateforme gazéification	440 000	440 000	440 000	440 000	427 935	467 239	430 373	475 020
Amortissement (30 ans)	14 667	14 667	14 667	14 667	14 264	15 575	14 346	15 834
Coûts d'investissement ligne pelletisation	/	/	/	/	52 000	52 000	52 000	52 000
Amortissement pelletiseur (10 ans)	/	/	/	/	5 200	5 200	5 200	5 200
Sous-total charges fixes (avec 70% subvention)	4 400	4 400	4 400	4 400	5 839	6 232	5 864	6 310
Charges variables								
Frais de maintenance (€/an)	2 874	5 831	2 874	5 831	3 317	6 274	3 317	6 274
charges de personnels (surveillance gazéifieur) (€/an)	4 016	4 016	4 016	4 016	4 016	4 016	4 016	4 016
charge personnel (préparation de la biomasse) (€/an)	2 945	8 835	2 945	8 835	3 748	11 960	3 748	11 960
Consommation électrique des auxiliaires	2112	6739	2112	6739	2003	6 394	2 003	6 394
Quantité biomasse nécessaire (t MB) et humidité H (%)	89 (H 50%)	285 (H 50%)	59 (H 25%)	189 (H 25%)	63 (H 30%)	201 (H 30%)	156 (H 68%)	499 (H 68 %)
Coût d'achat de la biomasse (€/an)	4 655	14 855	1 187	3 789	3 775	12 049	7 818	24 950
Coût de transport de la biomasse (€)	892	2 846	1 662	5 305	63	201	156	499
Sous-total charges variables (€/an)	17 493	43 122	14 796	34 516	16 923	40 893	21 059	54 092
Electricité produite (kWh/an)	45 120	144 000	45 120	144 000	45 120	144 000	45 120	144 000
Coût de production (€/MWh)	486	331	427	272	509	332	602	425

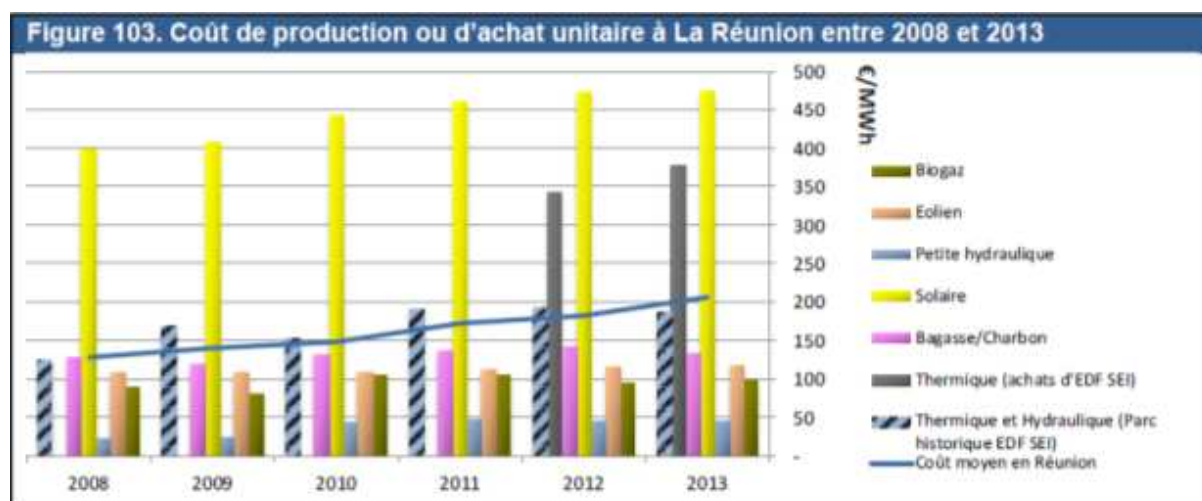
ANNEXE 6 : COUTS DE PRODUCTION DETAILLES DE L'ELECTRICITE DES SCENARIOS ACACIA REGION

Scénarios Acacia Région				
Durée de fonctionnement	6 000 h/an		6 000 h/an	
Charges fixes				
niveau subvention à l'investissement	50%		0%	
Coûts d'investissement gazéifieur	444 000		444 000	
Amortissement gazéifieur (30 ans)	14 800		14 800	
frais financiers	1 887 €		3 774 €	
Sous-total charges fixes (70% subv)	9 287		18 574	
Charges variables				
Frais de maintenance (€/an)	15 102		15 102	
charges de personnels (surveillance gazéifieur) (€/an)	12 851		12 851	
consommation électrique	18 432		18 432	
Quantité biomasse nécessaire (t MB)	949		949	
Coût d'achat de la biomasse (€/an)	22 464		22 464	
	Petite France	Notre Dame	Petite France	Notre Dame
Coût de transport de la biomasse (€)	1 366	4 079	1 366	4 079
coût d'élimination des cendres	689	689	689	689
Sous-total charges variables	93 832	96 545	93 832	96 545
Electricité produite (kWh/an)	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000
Coût de production (€/MWh)	215	220	234	240

ANNEXE 7 : COUTS DE PRODUCTION DETAILLES DE L'ELECTRICITE DU SCENARIO PALETTE REGION

Scénarios Palette Région		
Durée de fonctionnement	6 000 h/an	6 000 h/an
Charges fixes		
niveau subvention à l'investissement	50%	0%
Coûts d'investissement gazéifieur	1 710 300	1 710 300
Amortissement gazéifieur (30 ans)	57 010	57 010
frais financiers	7 269 €	14 538 €
Sous-total charges fixes (70% subv)	35 774	71 548
Charges variables		
Frais de maintenance (€/an)	73 010	73 010
charges de personnels (surveillance gazéifieur) (€/an)	151 269	151 269
Consommation électrique	92 160	92 160
Quantité biomasse nécessaire (t MB)	3 474	3 474
Coût d'achat de la biomasse (€/an)	69 474	69 474
Coût de transport de la biomasse (€)	1 737	1 737
coût d'élimination des cendres	4 203	4 203
Sous-total charges variables	387 649	387 649
Electricité produite (kWh/an)	2 400 000	2 400 000
Coût de production (€/MWh)	178	193

ANNEXE 8: COUTS DE PRODUCTION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE A LA REUNION (CRE 2014)



ANNEXE 9: COMPOSITION DE LA BIOMASSE ET DES CENDRES

composition de la biomasse (% MS)			
	Bois d'Acacia	Bois de Palette	Paille canne
Données utilisées (Phyllis 2) (Energy research Centre of the Netherlands 2012)	Moyennes sur 8 échantillons Phyllis sur fiches « Wood Pelett » #3061, 3290, 3315, 3316, 3317, 3320, 3321, 3074	moyennes Phyllis sur fiches "poplar" #289, 290, 291, 1340, 1690, 1828, 1930, 1971, 845, 806	Moyenne Phyllis 2 échantillons fiches « sugarcane leaves » (#2114) + « sugarcane trash » #2277
Unité	%	%	%
taux de cendre	2,36	1,62	9,6
C	47,94	50,46	41,8
H	6,10	1,13	5,4
N	0,26	0,35	0,4
S	0,02	0,03	0,063
O	42,55	45,98	42,4
Cl	0,043	0,04	0,3
Al	0,0325		
K	0,1184	0,38	
Na	0,0317	0,00	
Ca	0,2264		
Si	0,1588		
Mg	0,0399		
Fe	0,0402		
P	0,0523		
Ti	0,0175		
As	0,0003		
Cd	0,0000		
Cr	0,0006		
Cu	0,0004		
Pb	0,0032		
Zn	0,0034		
composition cendres pour 1kg de cendres			
Mode de calcul	Sur composition MS et taux de cendres	Données fiches Phyllis	Données fiches Phyllis

Unité	Kg/kg cendre	Kg/kg cendre	Kg/kg cendre
C	0,100	0,1	0,1
S	0,00015	0,000250	0,00050438
Al	0,01378	0,00653	0
K	0,05015	0,12336	0,14295159
Na	0,01345	0,00134	0,0011871
Ca	0,0959	0,33710	0,04460321
Si	0,067304	0,01866	0,31760948
Mg	0,01689	0,06850	0,01941588
Fe	0,017021	0,00692	0,00776165
P	0,022	0,00327	0,01104648
Ti	0,00742	0,00138	0
As	0,000125		
Cd	0,0000125		
Cr	0,0002547		
Cu	0,0001503		
Pb	0,0013530		
Zn	0,0014240		

ANNEXE 10: CALCUL DES EMISSIONS AGRICOLES POUR LA PAILLE DE CANNE ET LA CANNE FIBRE (METHODES AGRIBALYSE ET IPCC)

9.1 Emissions d'ammoniac (NH₃)

Méthode Agribalyse : Pour une fertilisation minérale :

$$NH_3 = 17/14 * EF * N_{\text{apportMin}}$$

Avec :

NH_3 = émission d'ammoniac volatilisé en kgNH₃/ha

EF = facteur d'émission de l'engrais minéral (kg NH₃-N/kg N total apporté)

$N_{\text{apportMin}}$ = quantité totale d'azote apporté sous forme d'engrais minéral

Facteur de conversion N-NH₃ en NH₃ = 17/14

9.2. Emissions de monoxyde d'azote (NO)

$$NO = 30/14 * (N_{\text{apportMin}} - NH_3) * 0,026$$

Avec :

NH_3 = émission d'ammoniac volatilisé en kgNH₃/ha

$N_{\text{apportMin}}$ = quantité totale d'azote apporté sous forme d'engrais minéral

Facteur de conversion N-NO en NO = 30/14

9.3. Emissions de nitrate (NO³⁻)

Paramétrage pour la filière végétale en zone tropicale (méthode GIEC 2007) de niveau 1 :

$$NO^{3-} = N_{\text{apportMin}} * 0,3$$

avec :

NO^{3-} = émissions de nitrate en kg/ha

Facteur de lessivage du nitrate = 30% de l'azote apporté.

9.4. Emissions de phosphate (P)

9.4.1. Phosphate lixivié

$$PL = P_{LM} * F_{CLB} * t$$

avec :

P_L Phosphore lixivié (kg/(ha*a))

P_{LM} Quantité moyenne de phosphore lixivé en fonction de la catégorie d'occupation des terres (= 1 pour les cultures tropicales)

F_{CLB} Facteur de correction pour la fertilisation avec lisier et/ou boues

t Temps d'occupation (=nombre de jours/365)

9.4.2. Phosphate ruisselé

$$P_R = P_{RM} * F_C * F_P * t$$

avec :

P_R Phosphore perdu par le ruissellement vers les rivières (kg/ha*a)

P_{RM} Quantité moyenne de phosphore perdu par le ruissellement en fonction de la catégorie d'occupation des terres.

F_C Facteur de correction en fonction de la forme du phosphore apporté (minéral, organique liquide/solide)

F_P Facteur « pente ». $F_P = 0$ si la pente est inférieure à 3% et 1 si elle est de 3% et plus

t Temps d'occupation (=nombre de jours/365)

9.5. Emissions de protoxyde d'azote (N_2O)

9.5.1. Emissions totales de N_2O

$$N_2O = 44/28 (N-N_2O_{\text{directe}} + N-N_2O_{\text{dat}} + N-N_2O_{(L)})$$

9.5.2. Emissions directes de N_2O des sols gérés

$$N-N_2O_{\text{directes}} = N-N_2O_{\text{entrées}} + N-N_2O_{SO} + N-N_2O_{PPP}$$

avec

$$N-N_2O_{\text{entrées}} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{RR} + F_{MOS}) * FE_1$$

$$N-N_2O_{SO} = F_{SO} * FE_{2,Trop}$$

- $N-N_2O_{\text{Directes}}$ = émissions annuelles directes de $N-N_2O$ imputables aux sols gérés, kg $N-N_2O$ an⁻¹
- $N-N_2O_{\text{N Entrées}}$ = émissions annuelles directes de $N-N_2O$ imputables aux entrées de N sur les sols gérés, kg $N-N_2O$ an⁻¹
- $N-N_2O_{SO}$ = émissions annuelles directes de $N-N_2O$ imputables aux sols organiques gérés, kg $N-N_2O$ an⁻¹
- $N-N_2O_{PPP}$ = émissions annuelles directes de $N-N_2O$ imputables aux entrées d'urine et de fèces sur les sols de paissance, kg $N-N_2O$ an⁻¹
- F_{SN} = quantité annuelle de N d'engrais minéral appliqué aux sols, kg N an⁻¹
- F_{ON} = quantité annuelle de fumier animal, compost, boues d'égouts et autres ajouts de N organiques appliquée aux sols, kg N an⁻¹
- F_{RR} = quantité annuelle de N retourné aux sols dans les résidus de récoltes (aériens et souterrains), y compris les cultures fixatrices d'azote et dues au renouvellement des fourrages/pâturages, kg N an⁻¹
- F_{MOS} = quantité annuelle de N minéralisé dans les sols minéraux associée aux pertes de C des sols de la matière organique des sols en raison de changements d'affectation des terres ou de gestion, kg N an⁻¹
- F_{SO} = superficie annuelle de sols organiques drainés/gérés, ha
- F_{PPP} = quantité annuelle de N d'urine et de fèces déposée par les animaux paissant sur des pâturages, parcours et parcelles, kg N an⁻¹ (Note : les indices inférieurs BVS et MA se réfèrent aux bovins, volaille et suidés, et moutons et autres animaux, respectivement)
- FE_1 = facteur d'émission pour les émissions de N_2O dues aux entrées de N , kg $N-N_2O$ (kg entrées de N)-1
- FE_{2Trop} = facteur d'émission pour les émissions de N_2O dues sols organiques drainés/gérés, kg $N-N_2O$ ha-1.an-1

9.5.3. Emissions de N_2O liées à la déposition atmosphérique d'azote volatilisé issus de la gestion des sols

$$N-N_2O_{\text{dat}} = [(F_{SN} * Fra_{CGAZE}) + ((F_{ON} + F_{PPP}) * Fra_{CGAZM})] * FE_4$$

avec :

- $N-N_2O_{(DAT)}$ = quantité annuelle de $N-N_2O$ produite par le dépôt atmosphérique de N volatilisé depuis des sols gérés, $kg\ N_2O-N\ an^{-1}$
- F_{SN} = quantité annuelle de N d'engrais minéral appliqué aux sols, $kg\ N\ an^{-1}$
- $Frac_{GAZE}$ = fraction de N d'engrais minéral volatilisé sous forme de NH_3 et de NO , $kg\ N$ volatilisé (kg de N appliqué) $^{-1}$
- F_{ON} = quantité annuelle de fumier animal géré, compost, boues de station d'épuration et autres apports de N organiques appliqués aux sols, $kg\ N\ an^{-1}$
- F_{PPP} = quantité annuelle de N d'urine et de fèces déposée par des animaux paissant sur des pâturages, parcours et parcelles, $kg\ N\ an^{-1}$
- $Frac_{GAZM}$ = fraction de matériaux d'engrais au N organiques appliqués (F_{ON}) et de N d'urine et de fèces déposé par les animaux paissant (F_{PPP}) volatilisé sous forme de NH_3 et de NO , $kg\ N$ volatilisé (kg de N appliqué ou déposé) $^{-1}$
- FE_4 = facteur d'émission pour les émissions de N_2O dues au dépôt atmosphérique de N sur les sols et les surfaces aquatiques, [$kg\ N-N_2O$ ($kg\ N-NH_3 + N-NO$ volatilisé) $^{-1}$]
- o Emissions de N_2O indirect par lixiviation

$$N-N_2O_{(L)} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{PPP} + F_{RR} + F_{MOS}) * F_{raclixi-(H)} * FE_5$$

- $N-N_2O_{(L)}$ = quantité annuelle de $N-N_2O$ produit par la lixiviation et les écoulements après ajouts de N aux sols gérés dans les régions où existent la lixiviation et les écoulements, $kg\ N-N_2O\ an^{-1}$
- F_{SN} = quantité annuelle de N d'engrais minéral appliqué aux sols dans les régions où existent la lixiviation et les écoulements, $kg\ N\ an^{-1}$
- F_{ON} = quantité annuelle de fumier animal géré, compost, boues d'égouts et autres ajouts de N organiques appliqués
- F_{PPP} = quantité annuelle de N d'urine et de fèces déposée par des animaux paissant dans les régions où existent la lixiviation et les écoulements, $kg\ N\ an^{-1}$
- F_{RR} = quantité annuelle de N retourné aux sols dans les résidus de récoltes (aériens et souterrains), y compris les cultures fixatrices d'azote, et dû au renouvellement des fourrages/pâturages, dans les régions où existent la lixiviation et les écoulements, $kg\ N\ an^{-1}$
- F_{MOS} = quantité annuelle de N minéralisé dans les sols minéraux, associé aux pertes de C des sols de la matière organique des sols en raison de changements d'affectation des terres ou de gestion dans les régions où existent la lixiviation et les écoulements, $kg\ N\ an^{-1}$
- $Frac_{CLIXI-(H)}$ = fraction de tout le N minéralisé/ajouté aux sols gérés dans les régions où existent la lixiviation et les écoulements, et perdue par la lixiviation et les écoulements, $kg\ N$ (kg d'ajouts de N) $^{-1}$
- FE_5 = facteur d'émission pour les émissions de N_2O dues à la lixiviation et aux écoulements de N , $kg\ N-N_2O$ (kg de N lessivé et écoulé) $^{-1}$

9.6. Valeur des paramètres retenus pour le calcul des émissions agricoles :

Emission agricole	Paramètres	Paille de canne	Canne Fibre
NH3	EF	/	ammonium sulphate, as N
			8
			urea, as N
			15
			ammonium nitrate phosphate, as N
P_L	P_{LM}	/	5
			diammonium phosphate, as N
			5
			potassium nitrate, as N
			2
P_L	P_{LM}	/	1
	F_{CB}	/	1
	t	/	1
P_R	P_{RM}	/	0,175
	F_C	/	1,1975
	F_D	/	1
	t	/	1
N_2O direct	F_{SN}	123	143
	F_{ON}	0	0
	F_{RR}	0	85,6
	F_{MOS}	0	0

	FE_1	0,01	0,01
	F_{SO}	1	1
	$FE_{2,Trop}$	16	16
	$N-N_2O_{ppp}$	0	0
$N-N_2O_{dat}$	F_{SN}	0	143
	$Frac_{GAZE}$	0	0,116
	$Frac_{GAZM}$	0	0
	FE_4	0,01	0,01
$N-N_2O_{(L)}$	$F_{raclixi-(H)}$	0,3	0,3
	FE_5	0,0075	0,0075

ANNEXE 11: PERTES DE C ET EMISSIONS AGRICOLES ET POUR LE SCENARIO PAILLE DE CANNE

10.1. Pertes de carbone suite à l'exportation des pailles

gains de C suite à l'arrêt du brûlis et mis en place de l'enfouissement des pailles, en phase de stabilisation en tC/ha/an ; (sols sableux Brésil, étude Cerri et al 2011)	3,08	en tC/ha/an
rapport entre pertes de C par brûlis comparé à l'enfouissement et pertes de C par exportation des pailles comparé à l'enfouissement (étude INRA 2002)	2/3	
perte de C en prélevant 2/3 des pailles	1,37E+00	en tC/ha
pertes C (méthode IPCC, répartition sur 20 ans)	6,84E-02	en tC/ha/an
conversion en CO ₂	2,51E-01	en tCO ₂ /ha/an

10.2. Calcul de l'azote libéré dans le sol par exportation des pailles (déstockage de carbone) :

rdt pailles tMS/ha	15	tMS/ha
Teneur azotée des pailles canne	0,4	% MS
Scénario de référence		
apport azoté organique des pailles du scénario de référence	60	kg/ha
Scénario Gazéification		
Rapport C/N d'un sol stabilisé	10	
pertes de C (par exportation des pailles)	0,069	tC/ha/an
libération N	6,9	kgN/ha/an

10.3. Emissions agricole (issues de la libération de l'azote par exportation des pailles de canne, soit 6,9 kgN/ha/an).

Emissions agricoles	NH ₃	NO	NO ³⁻	N ₂ O direct des sols gérés	N ₂ O indirect volatilisation N	N ₂ O indirect, lixiviation
Quantités émises (kg/ha)	2,02E+01	6,84E+00	4,29E+01	2,87E+01	2,62E-01	8,08E-01
				2,98E+01		
Compartiment d'émission	air	air	eau	air	air	air

D'après Agribalyses et IPCC

ANNEXE 12: DONNEES TECHNIQUES DE LA PRODUCTION AGRICOLE DE LA CANNE FIBRE

11.1. Itinéraire technique agricole

Itinéraire technique (Chambagri 2005, Sypecar 2015)		Modélisation ACV		
Taches agricoles	zone classée facile/moyen (h/ha)	processus EcolInvent utilisé	operation time (h/ha) (rapport EcolInvent, chap 15 p 194)	nbre ha eq/an
sillonage (pour 7 ans)	6	hoeing	1	0,9
charrue (pour 7 ans)	10	tillage, cultivating, chiselling	1,5	1,0
disques légers (pour 7 ans)	4	tillage, harrowing, by spring tine harrow	0,8	0,7
cultivateur (pour 7 ans)	8	tillage, rolling	0,9	1,3
buttage = sarclage (pour 7 ans) + Boutures	7	planting	10	0,1
distributeur engrais	2,8	fertilising by broadcaster	1,5	1,9
rampe + lance herbicide	10,6	application of plant protection products, by field sprayer	0,7	15,1
coupeuse péi (30t/j soit 5,6t/h) (caro Cane 21)	26,8	harvesting by complete harvester, beets	8	3,3
			operation time h/m3	nbre m3/ha
chargement des pailles	1,5	fodder loading by self loading trailer	0,02	1153,8

11.2. Fertilisation

Apport de fertilisants minéraux sur canne à sucre Réunion pour rendement 140t/ha canne sucre sur sol normalement fertile			
Matière active	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Dose de matière active apport engrais minéraux (en kgMA/ha)	143	46	190
apport des cendres de gazéification (kgMA/ha)	0	33	48
recommandations apports totaux (Fillols, Chabaliér 2007)	143	79	238

Fertilisants utilisé dans processus EcolInvent Canne Sucre Brésil (« sugarcane, at farm, BR »)	Dose apportée dans EcolInvent Canne Sucre Brésil kg/kg sugarcane	engrais présents Réunion	Répartition des engrais azoté processus EcolInvent Canne Sucre Brésil (%)	qté Réunion kgN/ha	% P2O5 ITK Brésil	qté Réunion kgP2O5/ha	%K2O ITK Brésil	qté Réunion kgK2O/ha
ammonium sulphate, as N	1,33E-04	OK	20,3	29,0				
urea, as N	3,98E-04	OK	60,8	86,9				
ammonium nitrate phosphate, as N	1,33E-04	NON		0,0				
diammonium phosphate, as N	1,16E-04	OK	17,7	25,3				
potassium nitrate, as N	8,30E-06	OK	1,3	1,8				
diammonium phosphate, as P2O5	3,46E-04	OK			68,2	31,2		
single superphosphate, as P2O5	2,23E-04	NON				0,0		
triple superphosphate, as P2O5	1,23E-04	OK			24,2	11,1		
phosphate rock, as P2O5	3,85E-05	OK			7,6	3,5		
potassium chloride, as K2O	1,63E-03	OK					98,00	185,8

potassium sulphate, as K2O	1,66E-05	OK					1,00	1,9
potassium nitrate, as K2O	1,66E-05	OK					1,00	1,9

11.3.Recommandations des traitements phytosanitaires, Plan Ecophyto

époque	Produit	Unité	DOSE CONSEILLÉE Ecophyto (Unité /ha/an)	Matière active 1	g MA/unité	qté gMA/ha	Matière active 2	g/unité	qté gMA/ha
pré+post	Camix	L	3,75	S-métolachlore	400	1500	Mésotrione	40	150
pré	Merlin	kg	0,1	Isoxaflutole	750	75			
pré	Mercantor Gold	L	0,5	S-métolachlore	960	480			
pré	Prowl 400	L	1,5	Pendiméthaline	400	600			
pré	Sencoral UD	kg	0,625	Métribuzine	700	437,5			
post précoce	Callisto	L	1	Mésotrione	100	100			
post	Dicopur 600	L	2	2,4 D	600	1200			
post	Starane 200	L	1	Fluroxypyr	200	200			

Source : Sypecar 2015, Ecophyto (Plaquette réduction de dose), + <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>

11.4.Composition des cendres de canne fibre

En absence de données spécifiques à la canne fibre, les données utilisées correspondent à la moyenne de données de la combustion de bagasse dans les centrales thermiques du Gol et de Bois Rouge

Composition des cendres de bagasse	
Elément	g/kg
K	1,99E+01
Ca	3,50E+01
Mg	1,72E+01
Na	3,34E+00
P	7,20E+00
S	2,15E+00
Si	1,97E+02
Fe	6,43E+01
Al	7,36E+01
Ti	1,38E+01

Source : d'après Fillols et Chabaliér 2007 p95

11.5.Emissions agricoles de la canne fibre

Emissions agricoles	NH ₃	NO	NO ³⁻	P lixivié	P Ruissellement	N ₂ O direct des sols gérés	N ₂ O indirect volatilisation N	N ₂ O indirect, lixiviation
Quantités émises (kg/ha)	2,02E+01	6,84E+00	4,29E+01	7,00E-02	2,10E-01	2,87E+01	2,62E-01	8,08E-01
				2,80E-01		2,98E+01		
Compartiment d'émission	air	air	eau	eau	eau	air	air	air

D'après Agribalyses et IPCC

Elément trace métallique (ETM)	Cd	CU	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
Emissions au sol (en mg/ha)	1,89E+03	4,15E+03	3,32E+04	4,46E+02	4,05E+03	2,42E+04	3,05E+01

d'après le modèle émissions ETM Agribalyse (fiche 4) ; flux entrants d'éléments trace métallique. Les flux de lixiviation sont déjà pris en compte avec le modèle UseTox et pour les flux liés à l'érosion comportent trop d'incertitude car l'allocation des dépositions atmosphériques n'est pas calibrée pour la Réunion.

ANNEXE 13: DESCRIPTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Impacts globaux :

- Changement climatique : phénomène d'effet de serre perturbé qui conduit à la hausse des températures. Ce phénomène est causé par des gaz à effet de serre (GES) tels que : CO₂, CH₄, N₂O.
- Destruction de la couche d'ozone : la couche d'ozone absorbe une partie des rayonnements solaire. La diminution de la couche d'ozone (trous dans la couche d'ozone) conduit à augmenter les rayonnements solaires, ce qui perturbe les équilibres en O₂ et ozone. Les conséquences sont des problèmes sur la santé humaine. Le phénomène est provoqué par l'émission de substances telles que les chlorofluorocarbures (CFC), halons, etc.
- Epuisement des ressources minérales ou fossiles : diminution de la disponibilité des ressources pour d'autres usages, selon les réserves actuelles, le taux d'extraction et de renouvellement de ces ressources.

Impacts régionaux :

- Radiations ionisantes : elles sont produites par la radioactivité et causent des dommages sur la santé humaine
- Acidification : correspond à la baisse du pH, ce qui perturbe les équilibres biologiques. L'acidification est causée par des substances acides (cf pluies acides).
- Eutrophisation : excès de nutriment (N,P) qui favorise le développement des algues et conduit à appauvrir l'oxygène disponible dans le milieu.

Impacts locaux :

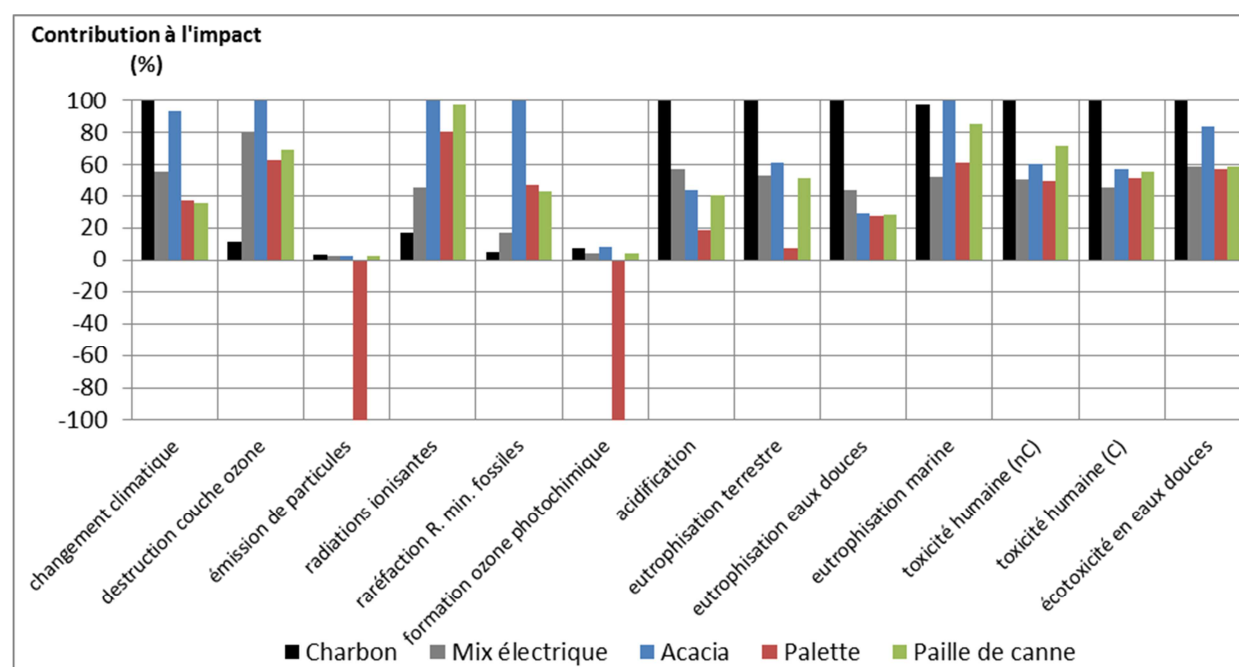
- Emission de particules : fines particules solides dans l'air qui ont des effets sur les voies respiratoires.
- Formation d'ozone photochimique : phénomène de « Smog » (brouillard urbain) qui correspond à une concentration d'ozone à très faible altitude. Les effets se produisent sur la santé humaine. Ce phénomène est causé par des combinaisons de gaz, de type NO_x et COV.
- Toxicité humaine : émissions de substances qui ont un effet sur la santé humaine ou sur les écosystèmes (métaux lourds, pesticides, etc.)

ANNEXE 14: MODELISATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU MIX ELECTRIQUE

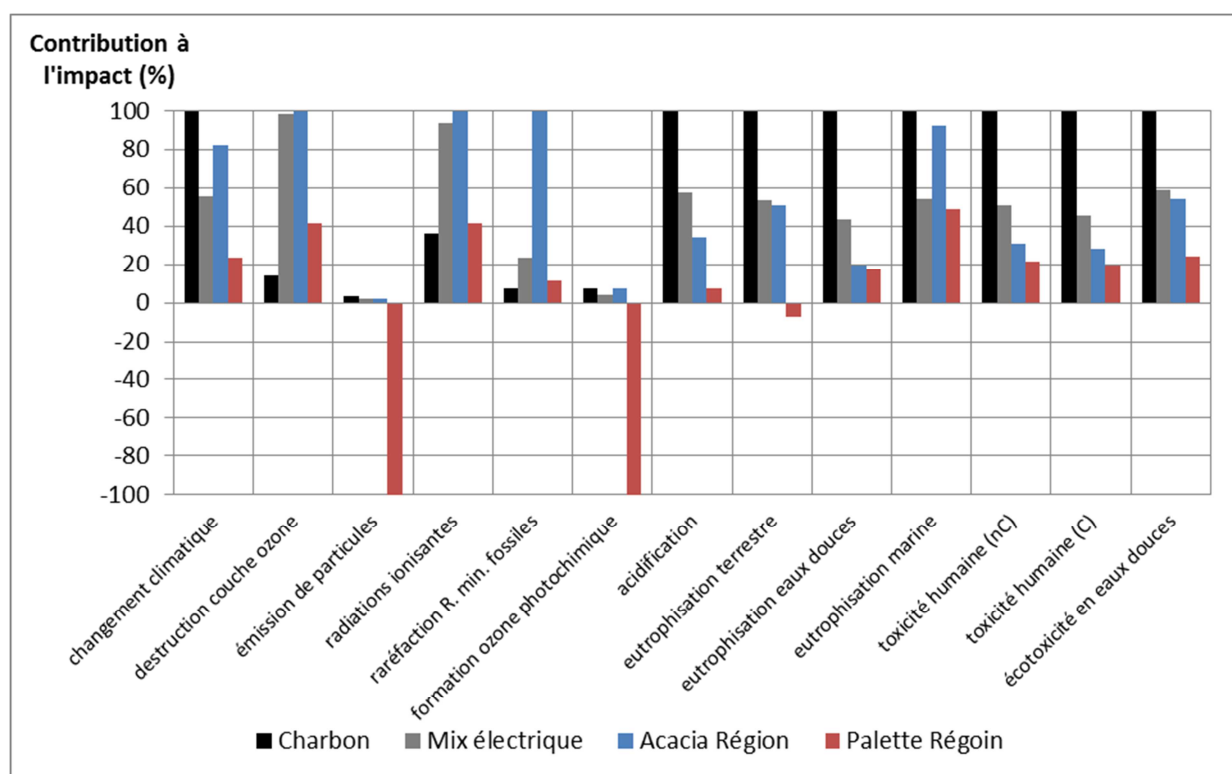
Données ecoinvent utilisées :

Type d'Énergie	Processus ecoinvent Utilisé
bagasse	Electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery/BR S
charbon	Electricity,charbon Afrique Sud Processus modifié de "Electricity, high voltage {FR} electricity production, hard coal Alloc Def, U " Avec extraction de charbon Sud Africain et transport maritime Afrique du Sud – Réunion
hydraulique	Electricity, high voltage {FR} electricity production, hydro, reservoir, alpine region Alloc Def, S
fioul	Electricity, high voltage {FI} electricity production, oil Alloc Def, S
photovoltaïque	Electricity, low voltage {FR} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted Alloc Def, S

ANNEXE 15: COMPARAISON DES IMPACTS DES SCENARIOS CFPPA PAR RAPPORT AU MIX ELECTRIQUE ET AU CHARBON



ANNEXE 16: COMPARAISON DES IMPACTS DES SCENARIOS REGION PAR RAPPORT AU MIX ELECTRIQUE ET AU CHARBON



ANNEXE 17: SENSIBILITE A LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DE L'UNITE DE GAZEIFICATION

Impacts des scénarios Acacia Palette et Paille de canne, avec une baisse de la consommation d'électricité de 23%, comparés à l'électricité produite à partir de charbon et mix électrique réunionnais

